



TITLE:

# 外鉄形変圧器の短絡強度に関する研究( Dissertation\_全文 )

AUTHOR(S):

大谷, 清二

---

CITATION:

大谷, 清二. 外鉄形変圧器の短絡強度に関する研究. 京都大学, 1965, 工学博士

ISSUE DATE:

1965-06-22

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r518>

RIGHT:

# 外鉄形変圧器の短絡強度に関する研究

1964年10月

大 谷 清 二

# 外鉄形変圧器の短絡強度に関する研究

DOC

1965

2

電気系

## 外鉄形変圧器の短絡強度に関する研究

## 内 容 概 要

本論文は、外鉄形変圧器が短絡時に発生する電磁力を1000 kVAモデル変圧器によつて究明し、設計段階において発生電磁力を予測する方法を確立するとともに、コイル群構成材の機械的性質を研究し短絡強度を増加する方策について論じたものである。

本論文は緒論、7章、結論よりなり各章の論旨はつぎのとおりである。

## 第1章 緒 論

変圧器短絡強度に関する社内、社外の研究状況を概説し、今回とくにモデル変圧器を作成して研究する必要性の生じた経緯と研究目標について述べた。

## 第2章 モデル変圧器

短絡強度を研究するにあたりとくにその目的のためにモデル変圧器を製作した。製作に先立ち機械的、電磁氣的相似性について検討をおこなつたが、いわゆる縮尺モデルは不完全な相似に過ぎないという結論に達したので、1000 kVAの標準設計のモデルを製作した。設計に当つては短絡試験時の測定を念頭におき種々の方策を立てたが、構造に関して詳述した。

## 第3章 漏洩磁束と電磁力の推定

従来使用されている計算式はきわめて不完全なものであるので、抵抗紙模擬による推定の方法を確立し、模擬をおこなう場合に発生する誤差の原因と大きさについて検討した。また二次元像によつて三次元像を解析する場合の等価性について論じ、総合精度を、モデル変圧器における漏洩磁束の実測と模擬とを比較して検討し、きわめて有効な手段であることを確認した。またモデル変圧器の各コイルに働く垂直方向、主方向の電磁力を推定し短絡試験の結果と比較する準備をおこなつた。

## 第4章 交流短絡試験

短絡試験設備を使用して短絡試験を実施したが、短絡下における変圧器の機械的性質を明らかにするために色々工夫をこらした測定法、試験方法に関して述べ、短絡試験の結果得られた



電磁力，コイルの運動，短絡による締付力のゆるみなどに関して事実を述べた。また非破壊的に変圧器の危険を事前に検知する方法を検討し，変圧器を分解点検した結果，改善すべき事項を提示した。

## 第5章 整流器用変圧器の直流側短絡試験

電力用変圧器は短絡の脅威にさらされる機会は少ないが，整流器用変圧器は短絡の機会がきわめて多いので，整流器と組合せて試験した結果，現象としては交流短絡とまったく同様に取扱えることを明かにした。

## 第6章 巻線構成材の機械的性質

コイル群，またそれを構成するプレスボード，銅線，銅線束，紙，矩形コイルの機械的性質を静的，動的の両面より検討を加え，外鉄形変圧器の短絡強度設計を合理的におこなうための基礎資料を得た。

## 第7章 電子計算機による検討

抵抗紙模擬による電磁力の推定は有効な手法であるが，人手を食う点で問題があり，設計段階で電磁力を推定できるプログラムを開発し，またコイルの運動を計算機で解析し，高速度カメラの実測結果と比較したところ良い一致を見たので，計算機の中で締付圧力，コイル群構成材の性質を変えて短絡強度を増加させる方法を検討した。

## 第8章 短絡強度を増強する方策

以上の解析をもとにして一部改良を加えたモデル変圧器を組立て，再度短絡試験を行なった結果，対策の有効であつたことが実証された。

## 第9章 結 論

以上，各章で得られた結論を要約した。

# 外鉄形変圧器の短絡強度に関する研究

## 目 次

第 1 章	緒 論	1
第 2 章	モデル変圧器	4
2.1.	機械的相似性	4
2.2.	電磁氣的相似性	7
2.3.	1000KVA モデル変圧器	9
2.4.	結 言	15
第 3 章	漏洩磁束と電磁力の推定	17
3.1.	電気学会の式による電磁力の推定	17
3.2.	抵抗紙による模擬	19
1.	模 擬 理 論	19
2.	具体的模擬方法	21
3.3	模擬に於ける誤差	23
1.	抵抗紙の性質	23
2.	導体の表現法による誤差	24
3.	点の大きさにもとづく誤差	27
4.	板電流の表現法	27
5.	測 定 誤 差	29
3.4	三次元像の二次元による解析	32
1.	2枚のコイルによる測定結果	32
2.	三次元を二次元で推定するときの誤差	35
3.5	モデル変圧器の漏洩磁束	41
1.	漏洩磁束の測定	41
2.	模擬の精度の総合検討	45
3.6.	抵抗紙模擬による電磁力の推定	47
1.	主方向電磁力	52
2.	垂直方向電磁力	53
3.7.	結 言	54

第 4 章	交流短絡試験	57
4. 1.	試験回路及測定	57
1.	試験回路	57
2.	短絡試験時の測定項目	59
3.	試験前後の測定項目	62
4.	測定器	62
4. 2	試験結果	63
1.	試験条件の選定	63
2.	初期締付力	64
3.	試験結果	65
4.	試験結果に対する検討	66
4. 3	故障検出	81
1.	モデル変圧器による実験	81
2.	故障検出法の検討	87
3.	漏洩リアクタンスの計算法	88
4.	静電容量の計算法	96
4. 4.	解体点検結果	103
4. 5.	結 言	105
第 5 章	整流器用変圧器の逆弧短絡試験	107
5. 1.	試験回路及測定	107
1.	逆弧電流の計算	107
2.	試験及測定回路	110
5. 2	試験結果	113
5. 3.	結 言	122
第 6 章	巻線構成材の機械的性質	123
6. 1.	銅線の機械的性質	123
1.	静的な性質	123
2.	動的荷重試験装置	127
3.	動的な性質	129
6. 2.	銅線束の機械的な性質	130
1.	集中荷重に対する性質	131
2.	分布荷重に対する性質	132

3.	多層梁の理論的解析	137
6.3.	矩形コイルの機械的性質	139
1.	集中荷重に対する性質 (直線梁としての考察)	139
2.	分布荷重に対する性質 (直線梁としての考察)	142
3.	曲り梁理論 (集中荷重)	146
4.	曲り梁理論 (分布荷重)	150
5.	曲り梁理論 (R部に正弦波分布荷重)	154
6.	多層曲り梁の数値解法	158
6.4	プレスボードの機械的性質	162
1.	静的特性	163
2.	動的特性	167
6.5.	コイル絶縁紙の機械的性質	168
6.6.	コイル群の機械的性質	169
6.7.	結 言	174
第7章	電子計算機による検討	177
7.1.	変圧器の締付	178
1.	INPUT	179
2.	SUB. BUILT	179
3.	SUB. STIFI	180
4.	SUB. DETRS POLHM	181
7.2.	電磁力の計算	181
1.	理 論 式	182
2.	SUB. TRFOX FOSMX	187
3.	SUB. TRFOY	189
4.	SUB. DELFY	189
5.	SUB. D STS	189
6.	SUB. FOSMY	190
7.3.	コイルの運動解析	190
1.	多次元振動系の運動方程式	191
2.	SUB. DYNA	194
3.	コイルの移動にともなう電磁力の変化分	194
4.	SUB. DTRFOX	196
5.	SUB. DFOSMX	196

6.	SUB. STIF2	199
7.	SUB. OSC9	197
7.4.	計 算 結 果	197
1.	電磁力計算結果	198
2.	コイルの運動解析	202
3.	二次元運動解析	206
7.5.	結 言	208
第 8 章	短絡強度を増強する方策	212
8.1.	確認のための交流短絡試験	212
1.	対 策	212
2.	交流短絡試験	213
3.	解体点検結果	217
8.2.	その他の方策	217
1.	カルタスパンを狭くする	217
2.	磁気中心を合せる	220
3.	コイルエンドを締付ける	221
4.	そ の 他	222
8.3.	結 言	222
第 9 章	結 論	224

## 第1章 緒 論

急速に増大する電力需用にこたえるために、電力系統は最近益々増大の傾向をたどっているが、当然のことながら系統の短絡容量は増大し、その系統につながる変圧器には大きな短絡強度が要求されるようになってきた。特に直接接地系では、一線地絡事故は三相短絡と同等電流となるために、変圧器短絡強度を要求される機会は非接地系よりも多くなっている。したがって変圧器の短絡強度は国の内外を問わずきわめて重要な研究課題となり、CIGREにおいても1956年頃より活潑に討論されてきた。国内においても、まづ遮断器の短絡試験設備の増強にともないそれに使用する昇圧用変圧器の短絡強度が問題となり、各社で自衛的に研究をおこなっている。

周知の如く三菱電機で製作する変圧器の内、大形のものは外鉄形変圧器であつて、この形の変圧器はW H社以外には作成している所は少く、したがって一般に発表されている文献からそのまま利用出来る情報を得られる機会は少ない。

当社に於ける短絡強度の研究歴史をかえり見ると、まづ70/10 KV 2000 KVA変圧器の短絡試験をあげることができる。これは昭和33年(1958)5月～9月の間、東京大学、電研、関西電力と協同のもとに使用年数20年～25年の老朽変圧器3台を用い、

- (1) 老朽変圧器の短絡時の電磁機械力に対する強度
- (2) 変圧器の短絡機械力に対する設計上の問題点
- (3) 短絡機械力の算定方法
- (4) 短絡による故障の検出法
- (5) 繰返し短絡を受けた変圧器の使用限度
- (6) 変圧器短絡試験方法の検討

などを研究目標として、相当大規模の試験、研究をおこなつた。当時としては画期的な試験であつて、外鉄形変圧器の短絡強度に関する有効な情報を多くうる事ができた。

- (1) 古い設計の変圧器に使用していた油ダクト形成用波形スペーサーは短絡時にズレてコイルに損傷をおよぼす。
- (2) 垂直方向機械力は予想以上に大きく破壊は垂直機械力によつて生じていると推定される。
- (3) 故障検出にはインダクタンスの変化が有効である。

などである。これらの結論は短絡試験より得られた情報であつて、電磁力の推定、コイル構成

材の検討などは、昭和25、26年に電気学会変圧器専門委員会の報告になるいわゆる電気学会の式によるものであつて、現時点から考えると古典的な考え方と言いえよう。

150/75/50/25/13.2KV HPL用変圧器は、当社伊丹製作所に在る遮断器試験設備の昇圧変圧器で、使用目的からいつて短絡専門の変圧器であり、1年間に3000回程度の短絡がおこなわれていると推定される。この変圧器の分解記録から、大形外鉄形変圧器の短絡強度に関する貴重な情報を得ているが、既存の設備であるので一般性に欠ける恨があり、また定量的に検討出来ない情報が多い。

内鉄形変圧器に対しては、整流器用内鉄形2230kVA変圧器の修理改造の機会をつかむことができ、昭和37年10月計画的に短絡試験をおこなつた。このときはじめて電子計算機を使用して発生電磁力の推定をおこなうことを試み、また国外、国内でも例を見ない抵抗紙模擬装置による漏洩磁束の推定、電磁力の計算をおこない、他方短絡時にプレッシャープレートに発生する電磁力を測定し、推定値と比較検討をおこなつた。

電気学会の式より一步前進して研究をおこなつたのはこれが最初で、とくに短絡時に働く電磁力の測定は国内では例が無く、外国にもまれなものであつた。この試験で、低圧側巻線のごとく巻数の少ないコイルは、巻き始め、巻き終りのために必然的に生じるATの不平衡によつてきわめて大きな電磁力が発生することがみとめられ、また計算機による推定、抵抗紙による磁界模擬の手法がきわめて有効であることが判明したのも大きな収穫であつた。

目を転じて国内他社の状況を推察すると、電気学会が短絡強度にたいする専門委員会を開いて検討をおこなつたのは昭和25、26年のころである。昭和34年にいたり、超高圧電力研究所が当時の世界最大級の短絡試験設備の建設に着手し、それに使用する試験用短絡変圧器は短絡専用の変圧器であり、しかも大容量、高電圧(500KV級)のものであることから、使用にさいしてじうぶんの確信をえるために、斯界の權威を求め、通産省の試験研究補助金の交付をうけて、1年間にわたり研究をおこなつたが、その中心となつたのはT社であつた。研究は多岐にわたり、最新の技術を駆使しておこなわれたが、研究目標としては

- 1) 電磁力の推定をより適確におこなう手法
- 2) 変圧器構成材料の機械的性質
- 3) モデル変圧器の短絡強度

をねらい、782kVA単相変圧器を多重円筒巻と円板巻の2種類、おのおの2台計4台を作り、2台は磁束測定、残り2台は短絡試験用として実験をおこなつている。

H社に於いては殆んど時を同じくして、300kVA 3φ変圧器を作り、主として電磁力の推定、

とくに磁気中心のずれた場合の推定と実例の比較をおこなっている。

諸外国に於いては、さきに述べたように、1956年以降CIGREにおいて活潑に討議がくりかえされ、最初は電磁力の推定、計算方法について研究されていたが、Beaver & Adamsがおこなった方法が最終案のようになり、その後円筒座標を二次元で等価に考え、鉄心の影響は鏡像を考へて電子計算機を使用して計算する方法がもつとも一般のものとなつている。このほか材料にたいする検討も1962年にいたつて動的な性質の研究が始められたが、まだじゅうぶんな結果をえていない。

本研究をはじめめる直接の動機となつたのは某社よりの大容量変圧器の受註決定である。この変圧器は容量、電圧において最大級のものであるばかりでなく、1ヶ月に平均5回程度の短絡に遭遇する可能性があり、それにじゅうぶん耐えることが仕様でうたわれているために、短絡強度のとくに強い変圧器の設計をおこなうための詳細資料が入用となつた。また世界最大級の短絡試験設備も建設中であつて、これに使用する昇圧変圧器の設計にも利用したい希望がある。

さらに加えて一般電力用変圧器の短絡強度の増加もこんど要求される気運にあるので、設計部門と協力のもとに研究を開始したわけである。

研究目標としては次の事項をかかげた。

- 1) 短絡時に発生する電磁力の大きさを基本設計段階において精度よく推定する方法を確立する。
- 2) 短絡時にコイルにかかる電磁力を測定し推定の精度を検証する。
- 3) 矩形コイルの機械的性質、コイル群の性質を究明し、合理的設計法、組立法を見出す。
- 4) 銅線、絶縁物の機械的性質を明かにする。
- 5) 変圧器の強度を決定する要因をさぐり、強度増強の方策をたてる。
- 6) 交流短絡と整流器逆弧時の比較をおこなう。

この目標を達成するために1年にわたつて研究をおこなつた結果を以下7章に分けてくわしく述べることとする。



## 第2章 モデル変圧器

変圧器の短絡強度を研究するにあたり、実物の変圧器について短絡試験を実施するには莫大な費用ときわめて大容量の短絡試験設備を必要とし、大形の変圧器に対しては現存する短絡試験設備では容量不足をきたすことは必至であつて、当然のこととして実物のかわりに小形のモデルを作つて短絡強度試験をする方法が考えられるわけである。モデルならば費用も比較的すくなく、また組立試験に要する時日も短くてすむわけであるが、モデルによつてえられた結果はそのモデルだけに適用されるものではなくて、実物に利用される情報がえられなければならない。普通考えられる方法としては、縮尺モデルと、標準設計の小容量器の2方法であるが、この両者を検討した結果、標準設計の方法を採用した。以下このことに関して論じる。

### 2.1 機械的相似性

応力、変形、偏位、挫屈の限度を求めるために小形のモデルによる測定をおこなつた場合に、モデルと実物との間の相似性は次元解析によつて求めることができる。

ある構造物のヤング率	$E$
ポアッソン比	$\mu$
代表長さ	$\ell$
他の寸法の代表長さ $\ell$ に対する比	$r_1, r_2, \dots$
構造物に加わる荷重の1つ	$P$
他の荷重の代表荷重 $P$ に対する比	$r'_1, r'_2, \dots$
荷重の方向	$r''_1, r''_2, \dots$
座標 $x, y, z$ に於ける応力	$\sigma$

とすると以上の諸量の間には、材料が HOOK の法則にしたがうかぎり、次のようなある函数関係がなり立つと考えられる。

$$\sigma = f(x, y, z, E, \mu, \ell, r_1, r_2, \dots; P, r'_1, r'_2, \dots; r''_1, r''_2, \dots) \dots \dots \dots (2.1-1)$$

一方、力と長さを基本の単位にとれば、この2つの単位を用いてつきの無次元量がえられる。

$$\frac{\sigma \ell^2}{P} \cdot \frac{x}{\ell} \cdot \frac{y}{\ell} \cdot \frac{z}{\ell}, \quad \mu, \frac{P}{E \ell^2}, \quad r_1, r_2, \dots, r'_1, r'_2, \dots, r''_1, r''_2, \dots$$

応力を与える函数関係はこれら無次元化量の間でも成立するから

$$\frac{\sigma \ell^2}{P} = f_1\left(\frac{X}{\ell}, \frac{Y}{\ell}, \frac{Z}{\ell}, \mu, \frac{P}{E \ell^2}, r_1, r_2, \dots, r_1', r_2' \dots r_1'', r_2'' \dots\right) \dots \dots (2.1-2)$$

(2.1-2) 式は実物についてもモデルについても成立し、右辺の函数の形は実物とモデルとで同じ形になるはずである。したがって右辺 ( ) 内の諸量が実物とモデルで等しければ左辺も等しくなり、相似性がなり立つことになる。そこで ( ) 内の諸量を等しくする条件を考えてみる。

まず実物とモデルとで  $r_1, r_2, \dots$  を等しくするためには、幾何学的に相似にする必要がある。 $r_1', r_2', \dots$  及び  $r_1'', r_2'', \dots$  を等しくするには荷重分布を相似にしなければならない。 $x/\ell, y/\ell, z/\ell$  を等しくするということは、実物とモデルとで対応する点を考えるということである。また構成材料の  $\mu$  は両者とも等しくしなければならない。このことはモデルと実物とまったく同じ材料を使用するという意味ではなく、 $\mu$  が等しければ異つた材料でもよい。最後に  $P/E \ell^2$  を等しくする必要がある。いま実物に添字  $p$ 、モデルには  $m$  をつけて表わすと

$$\begin{aligned} \frac{P_m}{E_m \ell_m^2} &= \frac{P_p}{E_p \ell_p^2} \\ \therefore \frac{P_m}{P_p} &= \frac{E_m}{E_p} \cdot \frac{\ell_m^2}{\ell_p^2} \dots \dots \dots (2.1-3) \end{aligned}$$

モデルに加える荷重の大きさを (2.1-3) 式が満足されるように与えれば相似性が成立する。

以上の条件をすべてみたして (2.1-2) 式の右辺 ( ) 内を等しくすれば左辺は当然等しく

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_m \ell_m^2}{P_m} &= \frac{\sigma_p \ell_p^2}{P_p} \\ \therefore \frac{\sigma_m}{\sigma_p} &= \frac{P_m}{P_p} \cdot \frac{\ell_p^2}{\ell_m^2} \dots \dots \dots (2.1-4) \end{aligned}$$

(2.1-4) に (2.1-3) を代入して

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_p} = \frac{E_m}{E_p} \dots \dots \dots (2.1-5)$$

この関係式をもちいてモデルの応力より実物に表れる応力を求めることができる。

上と同様に、応力以外の量についても同様の解析をおこなうことができる。たとえば変位  $U$  については無次元量  $U/\ell$  を考えると

$$\frac{U}{\ell} = f\left(\frac{X}{\ell}, \frac{Y}{\ell}, \frac{Z}{\ell}, \mu, \frac{P}{E\ell^2}, \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma'_1, \gamma'_2, \dots, \gamma''_1, \gamma''_2, \dots\right) \dots \dots \dots (2.1-6)$$

なる函数関係が成立し，まゝと同様実物とモデルについて (2.1-6) 式右辺 ( ) 内の諸量を等しくすれば，左辺も等しくなつて

$$\frac{U_m}{\ell_m} = \frac{U_p}{\ell_p} \dots \dots \dots (2.1-7)$$

となり実物の偏位はモデルの偏位の  $1/(\text{縮尺比})$  となる。

以上の所論中には，変化が小さいという仮定が入っていないから，構成材料が HOOK の法則にしたがうかぎり応力または変位が荷重に比例しないような大きな変位の領域に対しても相似性はなり立つことになる。

弾性限を超える領域でのモデルの相似性について考えてみるに，応力と歪との関係はつぎのように表わされる。

$$\frac{\sigma}{E} = f(\epsilon) \dots \dots \dots (2.1-7)$$

$\epsilon$ : 歪量

したがつて実物とモデルとの間で  $f(\epsilon)$  が一致している場合には，相似性は弾性限を超えて破壊の領域まで拡張することができる。 $f(\epsilon)$  を一致させるためにはモデルと実物の構成材料は同じものを使用する必要がある。静的に考えた場合，幾何学的比例モデルを作り，同じ構成材料を使用し，荷重の大きさは縮尺比の自乗に比例させた場合には，実物とモデルとの間には相似性が完全に成立し弾性限を超えるような領域にまで拡張できることが判明したが，動的条件のもとではどうなるかを検討してみる。

一般に荷重が時間的に変動する場合，応力-歪曲線は周波数の函数となり一定ではない。とくにこのことはコイル材料である銅線，プレスボードにおいてはなほだし。したがつてモデルと実物とでは荷重の変化速度は一致させる必要がある。他方構造物の動的な性質を検討する場合，固有振動数と励振力周波数の関係はきわめて重要な因子であるが，減衰を考えない二次振動系の固有周波数は

$$f = \text{const} \cdot \sqrt{\frac{P}{U} \cdot \frac{1}{\rho \ell^3}}$$

$\rho$ : 比重

であたえられる。したがつてモデルと実物の間では固有周波数の比は

$$\frac{f_m}{f_p} = \sqrt{\frac{P_m}{P_p} \cdot \frac{U_p}{U_m} \cdot \frac{\rho_p}{\rho_m} \cdot \frac{\ell_p^3}{\ell_m^3}}$$

のようになる。前述のように幾何学的相似モデルを同じ構成材を使用して作成した場合には (2.1-3), (2.1-7) が成立しているからこれらを代入すると

$$\frac{f_m}{f_p} = \frac{\ell_p}{\ell_m} \dots\dots\dots (2.1-8)$$

となり、固有周波数は縮尺比に反比例して高くなることがわかる。ところが一般に材料の応力-歪特性は周波数特性を持つているから、実物とモデルの間で動的に相似性を持たせるためには周波数を合せなければならないので、この点で根本的に矛盾する。また短絡時に発生する電磁力は電源周波数の2倍で変化するが、コイルの運動などを考える場合この固有周波数は数サイクルから数百サイクルの間にあるため、共振の問題はきわめて重大な研究課題であつて、この究明を相似モデルをもちいて研究せんとするならば、たとえ構成材の周波数にたいする非直線性を無視したとしても、電源周波数を縮尺比に反比例して高いものを使用しなければならないが、このことは短絡試験には大電力を必要とするので設備の点より不可能である。

以上の検討で明かなように、幾何学的相似モデルを作成した場合静的には相似性を満足することができるが、動的に考える場合には絶対的矛盾が生じ完全なモデルは機械量的方面からみても作成不可能のことが判明した。つぎに電磁気量的に見た場合にはどうかを検討してみる。

## 2.2 電磁氣的相似性

実物トランスを構成する物理量をつぎの如く定義した場合

長	さ	$\ell'$	透磁率	$\mu'$
時	間	$t'$	誘電率	$\epsilon'$
磁界の強さ		$H'$	磁束密度	$B'$
電界の強さ		$E'$	誘電線束密度	$D'$
導電率		$r'$		

Maxwellの電磁方程式は次の如くあたえられる。

$$\nabla \times H' = r' E' + \epsilon' \frac{\partial E'}{\partial t'} \dots\dots\dots (2.2-1)$$

$$\nabla \times E' = -\mu' \frac{\partial H'}{\partial t'} \dots\dots\dots (2.2-2)$$

$$B' = \mu' H' \quad \nabla B' = 0 \dots\dots\dots (2.2-3)$$

$$D' = \epsilon' E' \quad \nabla D' = 4\pi e' \dots\dots\dots (2.2-4)$$

(2.2-1) 式の右辺才一項は定常電流に対する項であり，才二項は偏位電流に対する項である。実物およびモデルに使用される材料は線形である，すなわち  $r', \epsilon', \mu'$  が時間の函数ではなく常数であるとする，(2.2-1) 式より

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{H}' = r' \nabla \times \mathbf{E}' + \epsilon' \nabla \times \frac{\partial \mathbf{E}'}{\partial t'} \dots \dots \dots (2.2-5)$$

一方ベクトル演算の公式より

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{H}' = \nabla \nabla \cdot \mathbf{H}' - \nabla^2 \mathbf{H}' \dots \dots \dots (2.2-6)$$

右辺才一項は (2.2-3) 式より 0 であるので，式 (2.2-5) 左辺は  $-\nabla^2 \mathbf{H}'$  となる。

(2.2-2) 式を (2.2-5) 式に代入すると

$$\nabla^2 \mathbf{H}' = \mu' r' \frac{\partial \mathbf{H}'}{\partial t'} + \epsilon' \mu' \frac{\partial^2 \mathbf{H}'}{\partial t'^2} \dots \dots \dots (2.2-7)$$

磁界の強さ  $\mathbf{H}'$  を Fourier 級数もしくは Fourier 積分に分解し

$$\mathbf{H}' = \mathbf{H}'_1 \cdot e^{j\omega'_1 t'}$$

と表すと， $\mathbf{H}'_1$  は場所のみの函数となり， $\omega'_1$  は常数である。この関係を (2.2-7) 式に代入すると次式のようになる。

$$\nabla^2 \mathbf{H}' = (j r' \mu' \omega'_1 - \epsilon' \mu' \omega'^2_1) \mathbf{H}'_1 \dots \dots \dots (2.2-8)$$

いまモデルの物理的諸常数には  $\ell$  を添字し，実物との比即 scale factor をつぎのようにさめると

$$\ell = \ell'/\ell' \quad \mu = \mu''/\mu' \quad \epsilon = \epsilon''/\epsilon'$$

モデルに対しては，(2.2-8) 式は (2.2-9) 式となる。

$$\frac{H}{\ell^2} \nabla^2 \mathbf{H}' = \left( j r \mu \omega H (j r' \mu' \omega'_1) - \epsilon \mu \omega^2 H (\epsilon' \mu' \omega'^2_1) \right) \mathbf{H}'_1 \dots \dots \dots (2.2-9)$$

(2.2-8) 式と (2.2-9) 式はそれぞれ実物とモデルに対して成立する式であるので，モデルが実物と電磁氣的に相似であるためには

$$\frac{H}{\ell^2} = r \mu \omega H = \epsilon \mu \omega^2 H$$

したがって

$$r \mu \omega \ell^2 = 1 \dots \dots \dots (2.2-10)$$

$$\epsilon \mu \omega^2 \ell^2 = 1 \dots \dots \dots (2.2-11)$$

あるいは時間の scale factor を用いて表せば次式となる。

$$r \mu \ell^2 = t \dots \dots \dots (2.2-10)'$$

$$\epsilon \mu \ell^2 = t^2 \dots \dots \dots (2.2-11)'$$

機械的相似モデルの条件としては 2.1.1 項でのべたように、モデルは実物と同じ構成材料を使用した縮小モデルであることが必要であつたが、この条件のもとでは

$$\varepsilon = \mu = \gamma = 1 \dots\dots\dots (2.2-12)$$

これを (2.2-10)' 式 (2.2-11)' 式に代入すると

$$\ell = t = 1$$

となり、モデル即実物となり縮尺モデルではなくなる。

ところで短絡強度試験の場合の現象を考えてみると、現象の時間的变化の度合はイムパルス電圧のときのように早くはなく、Maxwell の基本方程式 (2.2-1) 式の右辺才二項、即偏位電流に対する項は無視しても大きな誤は生じないものと推定される。これは式の誘導から明らかなように、(2.2-11)' 式の条件は除いてよいことであつて、この場合にはモデルと実物と同一材料を使用する場合には (2.2-10)' 式と (2.2-12) 式より

$$\ell^2 = t$$

すなわち時間を長さの縮尺の自乗の割り合いに縮尺すれば相似性が成立する。たとえばモデルを 1/5 縮尺で作つた場合には、電源周波数を 25 倍にするということである。しかしこのことは前記機械的相似性のところで動的相似性を保つためには縮尺比に反比例して周波数を高くする (5 倍) 必要がある点と矛盾する。またその時に触れたように、電源周波数を高くすることは設備の点より不可能である。

設備の点より時間の縮尺比を 1 に選んだ場合には、 $r$  若しくは  $\mu$  を 1 以外にしなければ電磁氣的相似性は成立しなくなる。たとえば導電率をなぶるとすると

$$r \ell^2 = 1$$

となり、モデルでは非常に導電率の高い材料で巻線を作らねばならない。このことは云うは易く実際問題として実行不可能なことである。

### 2.3 1000 kVA モデル変圧器

以上述べたように、モデル変圧器が完全に実物変圧器との間に機械的に、また電磁氣的に相似性を持つことは理論的考察においても不可能であることが判明したが、このほかにも工作面から考えて不可能と断言してよい事が数多くある。まづ才 1 に材料入手の点からみて、実物に使用する銅線の縮尺サイズの銅線はまづ入手不可能である。このことは導体絶縁紙においてしかり、プレスボード、鉄芯材料においてしかり、ほとんど望む寸法のは入手不可能

と言つても過言ではないと思ふ。さらに工作組立の面から見ても、実物と相似の組立は不可能である。大きさが小さくなつたからといつて工作精度組立精度を比例してあげられるものではない。

このように検討してみると、いわゆる縮尺モデルの不完全さが目立ち、さらに今後おこなふとする研究はある特定の仕様の変圧器に関する情報をえるだけではあまりにも費用の点で損失が大きく、当然のことながら短絡強度を要求される変圧器の設計に普遍的に役立つ情報をえなければならない。このことは換言すれば、発生する電磁力を適確に推定し、変圧器の機械的強度、応力などの理論式、とくにコイルの機械的強度の理論式を立て、銅線、絶縁物の機械的性質を明らかにし、(2.1-1)式の函数形をあらゆる部分について見付けだすことである。このことは一見不可能のように思へるがしかし過去の経験、先例から、変圧器短絡強度にもつとも大きな影響をあたえている部分、場所は判つており、無限の検討をする必要はない。また最近急速に発達してきた電子計算機を利用することによりいまでも不可能とされていた理論解析、とくに非線形の問題、多次元連立の問題の解法が可能となつた点、さらにまた測定技術の進歩により必要とする情報はほとんど得られるようになった点などを考えあわせれば、(2.1-1)式の函数形を見いだすことはかならずしも不可能としない。このような観点からモデル変圧器には標準材料を使用し、標準設計、標準工作のもとに小容量(1000 KVA)の変圧器を作ることと決定した。電気的仕様はつぎのとおりである。

高圧側電圧	6600-6330-6060V	電流	152-157-165 A
低圧側電圧	1300 V	電流	769 A
1000 KVA	60 $\sim$ 1 $\phi$ 乾 式		

このような仕様をえらんだのはつぎの理由である。

まず一次電圧を6KV級としたのは、短絡試験用発電機の定格電圧が13.2KVであり、これより低い方が発電機直接で試験が出来るために、なにかと便利であるので、13.2KV以下でなければならない。しかも変圧器の破壊強度を検討する場合には、過去の経験より約200%程度の過励磁をおこなふ必要があるであろうことが予想されるので、6KV級を定格電圧とした。さらに重大な理由は、測定からの要求である。変圧器コイルに発生する歪、荷重を測定しようとする場合、油浸の状態では測定することは技術的に不可能ではないが、取扱いが非常にわずらはしく気中のほうが望ましい。またコイルの運動を高速度カメラで撮影するためには、気中でなければ装置が非常に大げさになる。内鉄形変圧器で油中と気中の両方でコイルの運動を比較した結果大差がないという文献<sup>(6)</sup>も発表されているので、全試験を気中で行なうことにした。そのため絶縁の点より安心して試験出来る電圧として6KV級を選んだ。低圧側1300Vは交流短絡試験のほか、整流器逆弧の場合の電磁力の様相を研究する試験も行なう予定なので、使用する整

流器の定格電圧1500Vより決定された。

一次側に10%のタップを設けたのはタップ抜けした場合の磁気センターのずれによる影響を見るためである。1000kVAの容量はコスト、工作の面を検討して決めた。

才 2.3-1図 変圧器巻線仕様書 (H631900)

才 2.3-2図 絶縁組立図 (1/2) (H703640)

に巻線の詳細を示すが、この変圧器は高電圧、大容量変圧器の短絡強度の研究が出来るように絶縁寸法は、6KVの標準設計とはまったくことなり、超高圧変圧器と同様高圧コイルは段絶縁をほどこしている。コイル配置は1HL構造で、2.3-1図の巻線図より明かなように、#1, #2, #7, #8が低圧巻線で鉄心側にあり、#3, #4, #5, #6の高圧巻線を挟み、高圧巻線は高圧端子U側ほど対地、コイル間絶縁寸法は大きくなっており、タップは#5コイルの外側から抜けるようになっている。磁気センターは標準設計どおり最高タップの場合にはズレ5mmの内に入っているが、最低タップでは相当ズレるようにしてある。(2.3-2参照) このほか特異な点は測定のほうからの要求をいれるために絶縁構造を多少変更してあることで、#1, #2間の絶縁物厚さが低圧側標準厚さ11.2mmより厚く18.4mmとなっており、後述のコイル間荷重計(12mm)を挿入できるように厚くしたためである。またコイルに働く垂直方向電磁力をコイルエンド上部で測定するために、#2, #3, #6, #7, の高低各2枚のコイルにはコイル吊上バンドがかけられており、垂直方向荷重計をとおしてタンクに引き止められている。変圧器コイルにはかならず巻き始めと巻き終りがあり、このためにコイルの右半分と左半分ではATの重心位置は当然ずれを生じる。内鉄形変圧器の経験ではこのATのズレが短絡強度に大きな影響をあたえることがわかっており、また外鉄形変圧器でも低圧コイルのように巻数の少ないコイルは1ターン分の不平衡が10%を超える場合(この変圧器では15%)があるので、吊上バンドは左右に設けた。

第2.3-4図はモデル変圧器の外観写真である。ただしまだタンク補強材を取付ける前の姿である。タンク上部には端子、タップのほか吊上バンドの一部、および垂直方向荷重計を見ることができる。

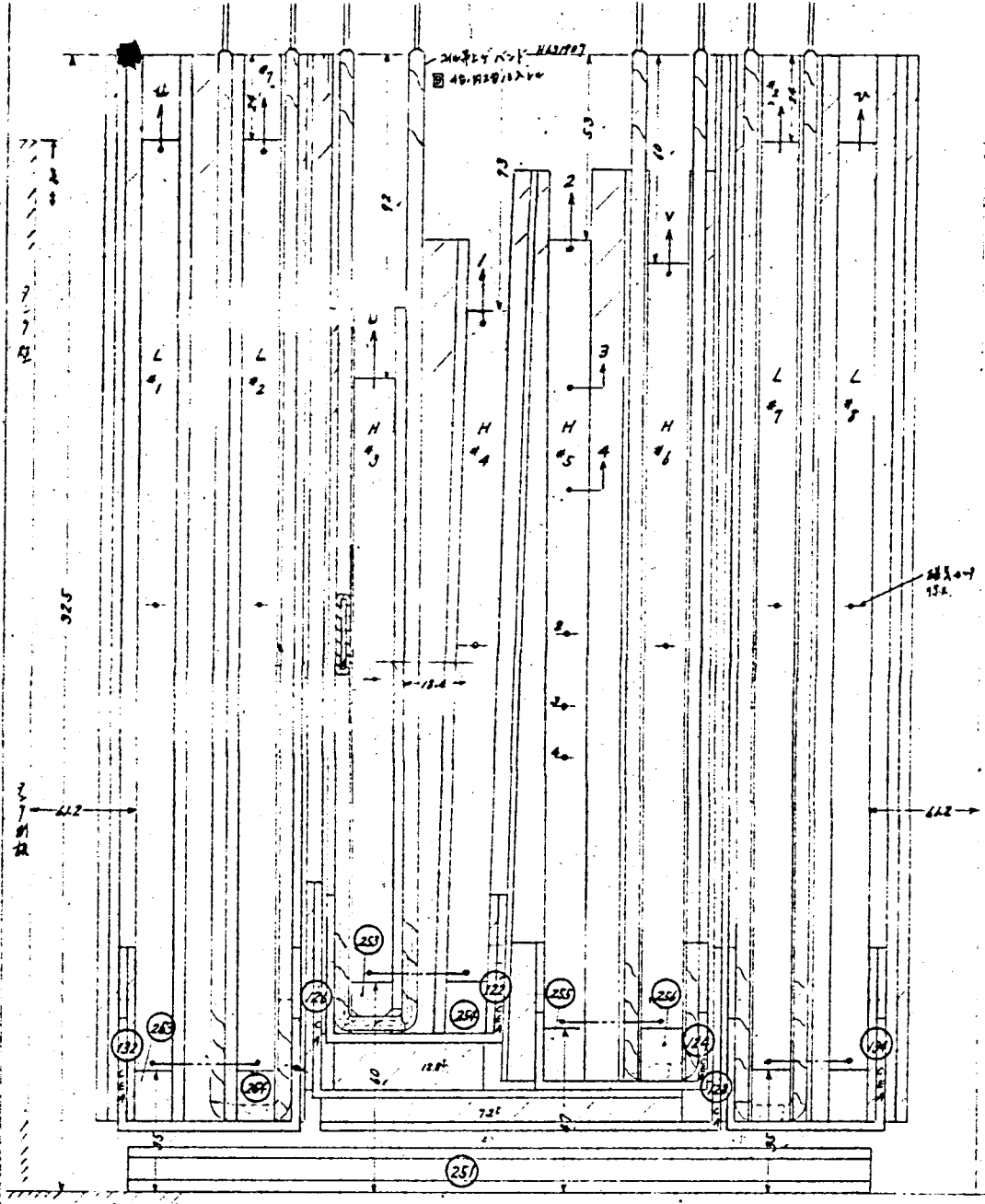
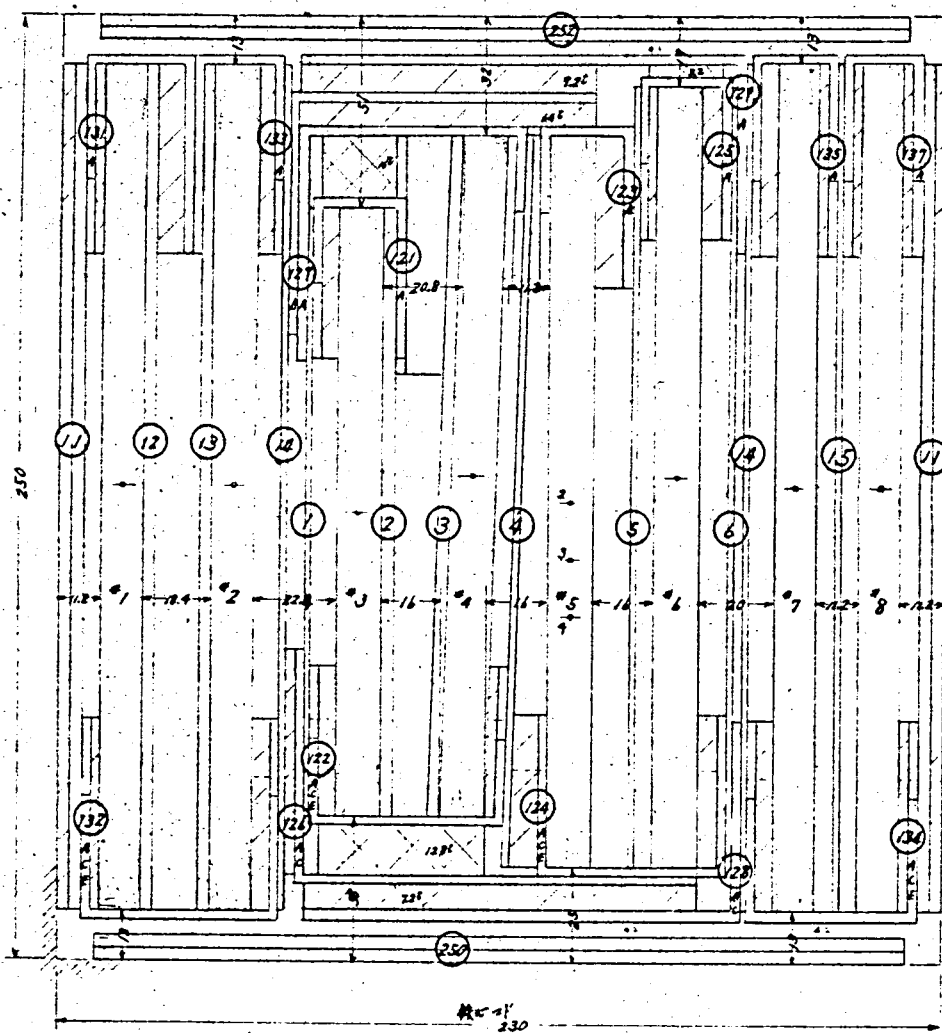
タンク構造は先述のように気中で試験をおこなうことにしたので、タンクはただ鉄芯を締付ける機能だけを持つことになっている。タンク上蓋、底蓋は点検、測定線の引出し、高速度カメラの撮影を可能とするためについていない。

変圧器の短絡強度を決定する要因としてコイル群の初期締付力が考えられる。また短絡時コイルに生じた機械力は鉄芯にすべてかかり、鉄心の反力と平衡しているわけであるが、電磁力の推定の精度の検証のうえからも、また短絡時の現象究明にも主方向機械力の測定はぜひとも必





7



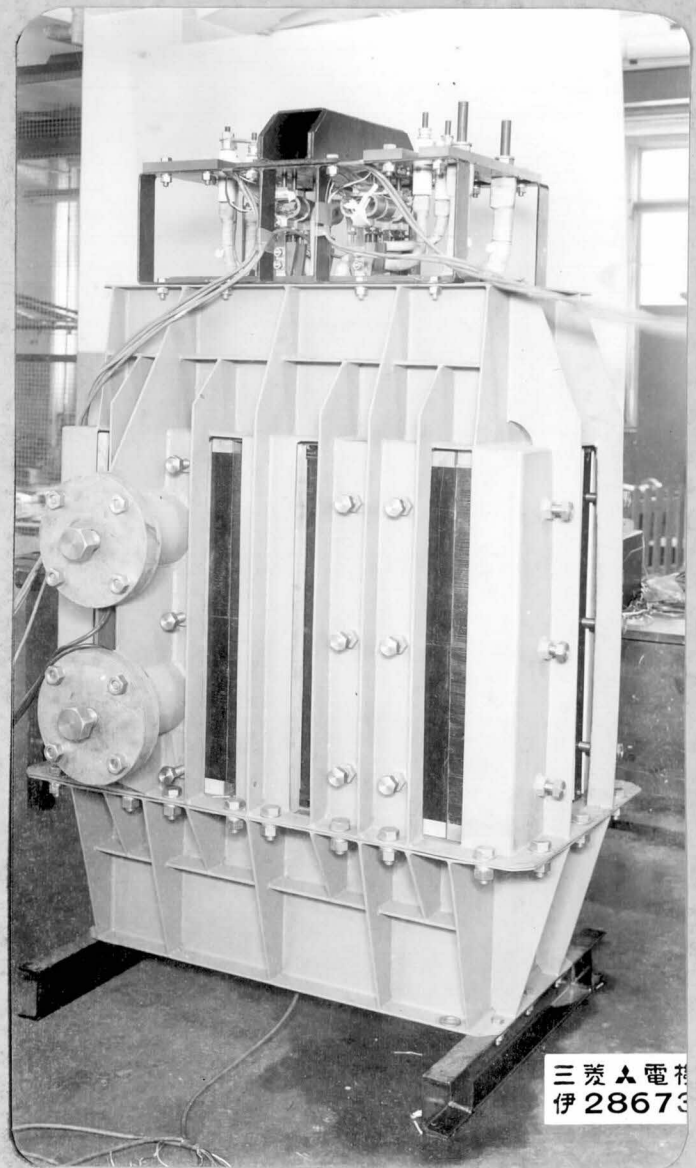
才Z.3-2(四)

一特·保留·常用字	第三角注	
五五五	片度 8	范錄組立園 (台)
五五五	三發電機株式會社	703640
五五五	五五五	

新入 1787

要であるので、この力を測定できるように、鉄心は接着鉄心を機械加工し、スライド面には二硫化モリブデンを塗って滑りをよくし、コイルにかゝる力が鉄心を介してタンクにとりつけられた50TONロードセルで測れる構造とした。組立時のコイル締付荷重は加重計とは反対面のボルトを締付けていくことによつて、任意の値に定めることができる。

コイル群の処理は大形変圧器にこなうのと同じグループ乾燥をほどこした。この方法は、絶縁物（プレスボード）を未処理のままコイルと組立て、コイル群を作つて仮締め、バインドがけの後、規定の温度で規定時間乾燥後油を真空含浸させる方法である。プレスボードの機械的性質は処理の方法如何で大きく左右されることが予想されるので、大形変圧器と同じ処理を行なったわけで



三菱電機  
伊 28673

第2.3.-4図 モデル変圧器外観（但し補強前）

ある。当然絶縁耐力も増加し気中の試験に安全度を高めている。

油含浸後鉄芯と組合せるまえに所定の荷重を加えて圧縮し、組立寸法を出すとともに初期荷重を加える作業は、100TON万能試験機で行なった。これらに関してはのちほど詳述する。

組立完成後の電氣的試験の結果では、無負荷励磁特性は低圧側より60 $\sim$ で励磁した場合、1200V（定格は1300V）で27.8Aの電流が流れ、損失は5,270Wと普通の変圧器よりも励磁電流が大きく、励磁音も高かった。これは接着鉄心を使用し、バットジョイント構造としたために鉄心に空隙を生じたためであるが、短絡強度試験をおこなう目的のためにはべつに支障はない。 イムピーダンスは

6600V/1300V	タップ	4.10%
6330V/1300V	ク	4.08%
6060V/1300V	ク	4.05%

で設計値にほぼひとしい。

## 2.4. 結 言

1. 幾何学的相似モデルを作り、実物とおなじ構成材料を使用し、荷重の大きさは縮尺比の自乗に比例させた場合には、実物とモデルとの間には相似性が完全に成立し弾性限を超えるような領域にまで拡張できる。〔静的考察〕
2. 幾何学的相似性モデルでは動的に考えた場合固有周波数は縮尺比に反比例して高くなる。一方使用材料の応力-歪特性は周波数特性を持つているので、実物と動的に相似性を持たせることは不可能である。
3. 短絡時に発生する電磁力は電源周波数の2倍であるから、モデルの機械的固有周波数と関係をあわせるためには、縮尺比に反比例して周波数を上昇させる必要があるが設備の点より不可能である。
4. 機械的相似モデルの条件を満足し、かつ電磁氣的相似性をみたすモデルは縮尺比1のものしかない。すなわち実物と同じものになる。しかし現象は遅いという、仮定のもとに立つて考えると、時間を長さの縮尺の自乗の割合に縮尺すれば電磁氣的相似性が成立する。このことは3と矛盾する。
5. 機械的相似モデルを作ることは実際上は不可能である。使用材料がすべて縮尺比に縮尺された材料入手は規格外品となり入手できない。さらにまた工作誤差を縮尺比に比例して小さくすることも不可能である。
6. 標準設計の小形変圧器では、ある特定の实物変圧器の模擬はできないが、理論推定との一致性を見るための試験と考えればより一般的基礎資料が入手でき、工作上にもまったく問題はなくなる。理論的考察は、電子計算機の利用と高級な計測法によって高度な検討が可能である。
7. 1000 KVA , 6.6KVの乾式変圧器を作成したが種々の特徴を持つ。
  - (1) 主方向電磁力が測定可能であり、また組立が簡単になるように鉄心は圧着鉄心、バットジョイントである。
  - (2) 垂直方向電磁力が測定可能である。
  - (3) コイルの動きが観測できるようなタンク構造である。
  - (4) 磁氣的条件はタップによつて変えられる。

## 文 献

- 1) M.Hetenyi, J.N. Goodier

Handbook of Experimental Stress Analysis

P 1035 ~ 1045

- 2) P.A. Abetti

Transformer Models for the Determination of Transient Voltages

A.I.E.E. Vol 72. 1953. P468 ~ 475

- 3) T.Hurter & C.Ecklin

The Electromagnetic Model for Transformers

B.B. Review, Vol 45. 1958. P.410 ~ 418

- 4) M.Christoffel & Hurter

Study of the Short-Circuit Stresses of Transformer Windings by

Means of Reduced Scale Models

CIGRE NO. 112 1960

- 5) Y. Tournier, A.Ciniero, A.B. Madin

A Study of the Dynamic Behaviour of Transformer Winding under  
Short-Circuit Conditions

CIGRE NO. 143 1962

- 6) 窪田・奥山

変圧器電磁機械力のモデルによる検討

36年 連合大会 627

- 7) 浅川・清水

電磁機械力に関する変圧器モデルの等価性

35年 東京支大会 164

### 第3章 漏洩磁束と電磁力の推定

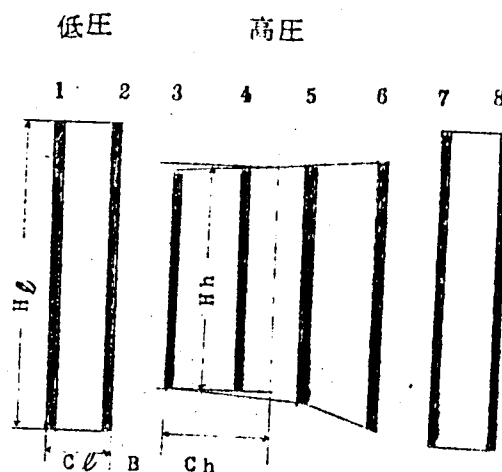
変圧器の短絡強度試験を実施するにさきだち、コイルに働く電磁力の推定をおこなった。  
 これまでおこなわれている方法は、いわゆる電気学会の式といつて、昭和25、26年に電気学会が専門委員会を作りまとめたもので、電気学会雑誌743号に発表されたものである<sup>(1)</sup>。  
 そのごCIGREにおいて、主として内鉄形変圧器の電磁力、とくに軸方向電磁力の推定の方法が発表され、電子計算機を使用して電磁力を計算すれば精度良く求められるという結論に達し<sup>(2)(3)</sup>ているが、本章においてはまづ抵抗紙模擬による推定をおこない、つぎに、得られた結果の推定精度を検定するために、モデル変圧器の漏洩磁束の実測値と比較をおこなったところ精度良く一致していることがわかり、きわめて有効な手法であると判断されたので、電磁力の推定に利用した。

電磁力の推定の精度の検証は次章交流短絡試験のところでおこなっている。

#### 3.1. 電気学会の式による電磁力の推定

電気学会の式は簡略計算であつて、1枚のコイルごとに着目して計算をおこなうことはできない。そこで右図のように変圧器を中央で対称であると考え、たとえば左半分のみについてかんがえることとする。

- $H_h$ : 高圧コイルの巾
- $H_\ell$ : 低圧コイルの巾
- $C_h$ : 高圧コイル群の厚さ
- $C_\ell$ : 低圧コイル群の厚さ
- $B$ : 高低圧間寸法
- $M_t$ : コイル一巻平均長



オ 3.1-1図 コイル配置

とし、かつ高圧、低圧ともATは $C \cdot H$ で囲む面積の内にいちように分布されていると仮定すると

$$\text{漏洩磁路長 } \alpha = \frac{2 H_h H_\ell}{H_h + H_\ell} + \frac{C_h + C_\ell + B}{3} \dots\dots\dots (3.1-1)$$

$$\text{漏洩磁束密度 } B_m = \frac{0.4\pi N i_m}{\alpha} \dots\dots\dots (3.1-2)$$

N : 群内巻回数

$i_m$  : 短絡電流の最大値

i : 定格電流

Z : % イムピーダンス

直流分をまったく含まぬ場合について考えると

$$i_m = \sqrt{2} i / Z$$

短絡時に発生する水平機械力 (巻線長さ  $l_m$  当り) は

$$\begin{aligned} K_{\max} &= \frac{1}{2} B_m \cdot i_m N \frac{10^{-6}}{9.81} \text{ (dyn)} \dots\dots\dots (3.1-3) \\ &= 640 (i_m N)^2 / \alpha \cdot 10^{-10} \text{ (kg)} \end{aligned}$$

で与えられる。漏洩磁束は高低圧間では一様であるが、コイル群内では A T に比例すると考えられる。すなわち高低圧間に接近するコイルには最大機械力が発生し、それは (3.1-3) 式であたえられる水平全機械力に、コイル板数を  $m$  として

$$K = \frac{2m-1}{m^2} \dots\dots\dots (3.1-4)$$

を乗じたものである。いまの場合は  $m = 2$  であるので、 $3/4:1/4$  に分担される。1000 KVA モデル変圧器の寸法を入れて計算すると

$$\# 2, \# 3 \text{ に発生する水平機械力} = 17.9 \text{ ton/M} \quad (\text{D.C 分なし})$$

$$\# 1, \# 4 \quad \quad \quad = 5.95 \text{ ton/M}$$

となる。

垂直方向電磁力は

$$K_v = 2K_{\max} \cdot n_{HL} \cdot \frac{Q \times d}{D} \text{ (kg/M)} \dots\dots\dots (3.1-5)$$

Q = コイル心形巾 + コイル巾

d = 垂直変位

D = 磁気中心の距離

$n_{HL}$  = 高低圧群数

垂直変位を 10 mm として、モデル変圧器について計算すると

$$K_v = 3.4 \text{ TON}$$

となる。以上の計算には相当大的な仮定もはいつており、実際との一致性も疑問視されているので、さらに詳細に検討できる抵抗紙による模擬法により推定をおこなうことにした。

### 3.2. 抵抗紙による模擬

#### 3.2.1. 模擬理論<sup>(4)</sup>

デカルト座標系で、Z 方向に一定な二次元空間を考えると。電流ベクトルの方向は Z 方向のみに存在する場合を考えると、二次元定常磁界の方程式は

$$\text{電流密度} \quad \mathbf{H} = (0, 0, 1)$$

$$\text{磁界のベクトルポテンシャル} \quad A = (0, 0, A)$$

$$\text{磁束密度} \quad \mathbf{B} = (B_x, B_y, 0)$$

とすると

$$B_x = \frac{\partial A}{\partial y} \quad B_y = -\frac{\partial A}{\partial x}$$

$$i = (\text{rot} \frac{1}{\mu} \text{rot} A)_z = -\left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) \right\}$$

$$\therefore \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -i \quad \dots\dots\dots (3.2-1)$$

であたえられる。

一方定常電流場で成立する式は

$$\text{電流密度} \quad \mathbf{i}$$

$$\text{電荷} \quad \rho$$

$$\text{固有抵抗} \quad \rho$$

$$\text{電位} \quad V$$

とすると

$$\text{div} \quad \mathbf{i} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

$$\mathbf{i} = -\frac{1}{\rho} \text{grad} V$$

$$\therefore \text{div} \frac{1}{\rho} \text{grad} V = \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

$\frac{\partial \rho}{\partial t}$  はその点における電荷量の変化，すなわちその点に湧く電流に等しい。したがって

$$\mathbf{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

とすると

$$\text{div} \frac{1}{\rho} \text{grad} V = -\mathbf{j} \quad \dots\dots\dots (3.2-2)$$

故にデカルト座標系を考え、しかも Z 方向に一定なる二次元の電流場では

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial V}{\partial y} \right) = -\mathbf{j} \quad \dots\dots\dots (3.2-3)$$



となり、(3.2.-1)式とまったく同じ式となる。このことは定常磁界の問題は定常電流場によつて完全に模擬できることを意味する。定常電流場は、抵抗紙を使用すれば簡単にシミュレートすることができるので、定常磁界の問題は、抵抗紙模擬によつて、解決できることになる。まず模擬にあつて、つぎの対応関係を採用する。

$$\rho = \frac{\mu}{\alpha} \dots\dots\dots (3.2.-4)$$

$$j = \frac{1}{s} \dots\dots\dots (3.2.-5)$$

ただし  $\alpha, s$  は変換係数 (Scaling factor) である。(3.2.-4) (3.2.-5) 式を (3.2.-3) 式に代入すると、(3.2.-3) 式は (3.2.-6) 式となる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha}{\mu} \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\alpha}{\mu} \frac{\partial V}{\partial y} \right) = -\frac{1}{s}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial (\alpha s V)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial (\alpha s V)}{\partial y} \right) = -i \dots\dots\dots (3.2.-6)$$

(3.2.-6) 式と (3.2.-1) 式の比較より、ベクトルポテンシャル  $A$  は次式であたえられる。

$$A = \alpha s V \quad \text{weber/m} \dots\dots\dots (3.2.-7)$$

但し

$$\left\{ \begin{array}{l} V = \text{ボルト} \\ \mu = \mu_s \times 4\pi \times 10^{-7} \quad \mu_s : \text{比透磁率} \\ \rho = \Omega \\ i, j = \text{Ampere/m}^2 \end{array} \right.$$

磁束密度は、次式のようになる。

$$\left\{ \begin{array}{l} B_x = \frac{\partial A}{\partial y} = \alpha s \frac{\partial V}{\partial y} \\ B_y = -\frac{\partial A}{\partial x} = -\alpha s \frac{\partial V}{\partial x} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3.2.-8)$$

電流を通ずる導体に働く電磁力は、電流の方向ベクトルを  $\ell$ , 磁束密度ベクトルを  $B$ , 電磁力ベクトル  $F$  とすると

$$F = i [d\ell \cdot B] \dots\dots\dots (3.2.-9)$$

であたえられる。こゝに  $i$  は着目している導体に流れている電流の大きさであり、 $B$  はその点における外部磁界の磁束密度であつて、 $i$  自身による磁束密度をふくんでいない。いまかんがえている空間では電流は  $z$  方向のみに流れているために、電磁力は  $x, y$  成分しか存在しない。

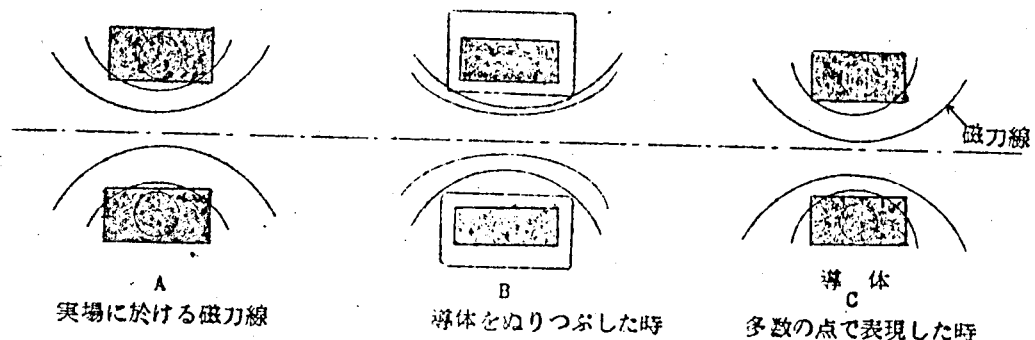
$$\left\{ \begin{array}{l} F_x = -i \cdot \ell_z \cdot B_y = -i \cdot B_y \\ F_y = i \cdot \ell_z \cdot B_x = i \cdot B_x \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3.2.-10)$$

ゆえに模擬装置により電磁力を求めるには、(3.2-8)式によつて注目点の磁束密度を求め、実場の電流値を(3.2-10)式にしたがつて乗ずることにより求められる。力は常に電流および磁界の方向に直角であつて、電流、磁界および力の三方向は右手系を成している。

### 3.2.2. 具体的模擬方法

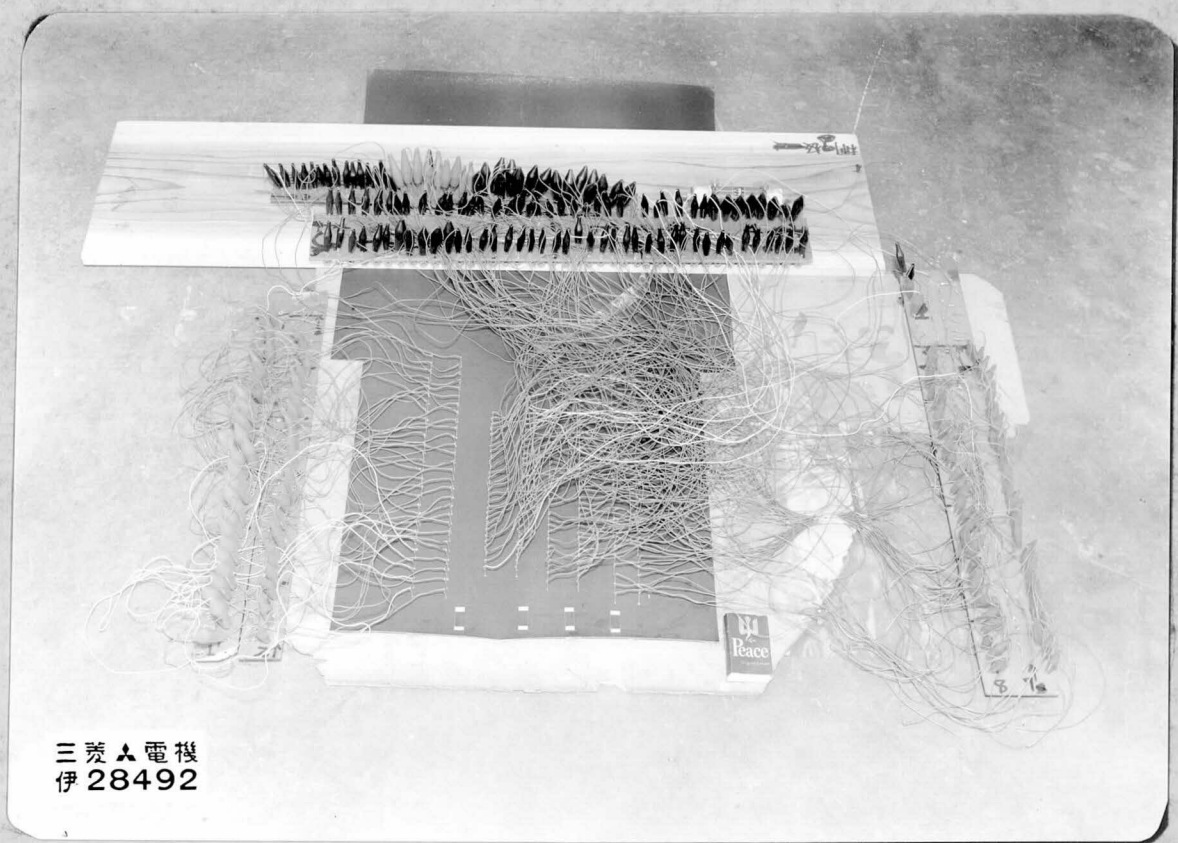
模擬理論より明らかなように、磁場を定常電流場で模擬するには、導磁率にたいしては抵抗を対比させ、導体電流（二次元の場合には、 $z$ 方向成分しか存在しない）に対しては抵抗紙への流入電流を対比させ、磁場空間に相当する場を抵抗紙の上に同一スケールもしくは適当な縮尺比で画けばよい。普通磁場を解く場合には、空気中と鉄心の間では $\mu$ の比が数百あるので、鉄心に相当するところは抵抗紙を切り取り、空気中に相当するところは抵抗紙に対比させて使用する。

導体の表現の仕方としては、導体相当部は多数の電流供給点に分割し、各点に等しい電流を供給する。なぜこのようにするかといえば、もし導体部分を塗りつぶしてしまうと導体内では $\rho=0$ 、即  $\mu=0$  となり、導体内ベクトルポテンシャルは同一値となる。すなわち磁束



第 3.2-1 図 導体の表現法

は導体とは鎖交しないことになる(3.2-1図参照)。実場においてはA図のように導体とも鎖交しているはずであるので、Cのように多数点で表現した方がよい。しかし実際問題として変圧器を模擬するような場合、導体1本、もしくは1ターンを多数点に分割することは不可能な場合が多い。測定に要する時間、模擬装置の設備の大きさ、工作精度などを考え合わせると、実用上は電流流入点の本数は200本程度に限定されるので、変圧器のコイルの表現の場合には、コイル断面をいちょうに電流が流れている板電流と考え、適当な数に分割するのが普通である。電流流入点は第3.2-2図の例にも示されるように、虫ピンを抵抗紙に差し込んで作られるが、ピンと抵抗紙表面との接触をよくするために導電ペイントをピンの先に塗って差し込むことにしている。電流供給は600Vの安定化直流電源より高抵抗を通じておこなわれるが、高抵抗は多数個の中よりとくに値の等しいものをえらびだして使用している。



第 3.2-2 図 抵抗紙による変圧器磁場の模擬

抵抗紙は巴川製紙のオームペーパーである。紙大きさは  $500 \times 900$  で、これ以上のものは製作していないが、実用上この程度あれば充分である。

ベクトルポテンシャルの測定にはチョッパアンプ形の直流微小電圧計を使用し、シールドには充分注意をはらう必要がある。

最近急速に発達して来た計数形電圧計とプリンターを使用すれば、作業員も 1 人で済み、誤りもすくなく、たいへん効果のあがることがわかっている。

磁束密度を測定する場合には、 $\partial V / \partial x$ 、若しくは  $\partial V / \partial y$  を直接求められるように、探針間隔 5 mm のものを作っておき、任意の場所の磁束密度を簡単に求めることができるようにしている。導体に働く電磁力を測定する場合は、ピンとピンとの中間の位置で、ピンの列の両側等距離の電圧を或ピン電圧を基準として測定し、計算によつて  $\partial V / \partial x$ 、 $\partial V / \partial y$  を求めるのがもつとも精度がよいことが実験の結果判明したのでこの法によつている。

模擬装置は、電流供給の ON OFF を簡単におこなえるように、ピンからのリードの他端はミノムシクリップで抵抗をつまむようにしている。

推定をおこなうにあつては、どの程度の誤差が含まれているか大略の値を知っておくことは重要である。以下の項で論じることとする。

### 3.3. 模擬に於ける誤差

模擬理論を実際に実施する場合に、種々の誤差はいりこむ。原因は模擬につかう抵抗紙および導体の表現法、測定精度に大別できる。

#### 3.3.1. 抵抗紙の性質

試験に使用した抵抗紙は、巴川製紙試作用片面導電紙で試作番号№40のものである。紙大きさ  $820 \times 200$ 、および  $900 \times 500$ 。

##### 1) 1枚の紙の中における抵抗値のバラツキ

導電紙の製作の過程より考えて縦方向と横方向に抵抗値に差のあることが予想されるので、1枚の導電紙より縦、横両方向に  $10 \times 20$  のサンプルを各々45枚作つて比抵抗を測定したところ

$$\text{横方向 } \bar{\rho} = 670.7 \Omega \quad \sigma = 37.6 \Omega \div 5.6\%$$

$$\text{縦方向 } \bar{\rho} = 641.4 \Omega \quad \sigma = 38.6 \Omega \div 6\%$$

$$\text{縦横の差 } \Delta \bar{\rho} = 29.3 \Omega \div 4.5\%$$

であつた。さらに方法を変え、平行電流場を作つて任意の点の  $10 \text{ mm}$  間の電圧を測定したが、バラツキは同じ程度であつた。サンプルテストの時のヒストグラムを第3.3.-1図に示す。

##### 2) 紙間のバラツキ

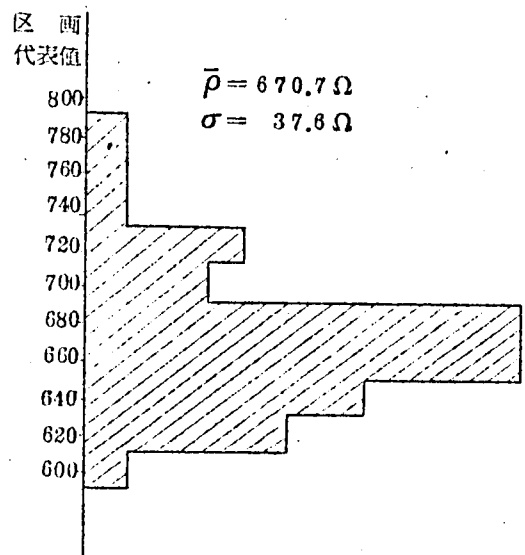
普通一問は1枚の紙で解き、またかならず同じ紙より  $\rho$  決定用のサンプルをとることにすれば、紙間のバラツキはあつても問題にならないことであるが、参考のために26枚の導電紙の間より縦、横各2枚のサンプルを取り出し測定したところ、バラツキは5%程度で紙内バラツキと同じであつた。ただ抵抗値の平均が  $450 \Omega$  程度しかなく、1) に比し非常に低いので温度と湿気の影響を検討した。

##### 3) 温度一比抵抗特性

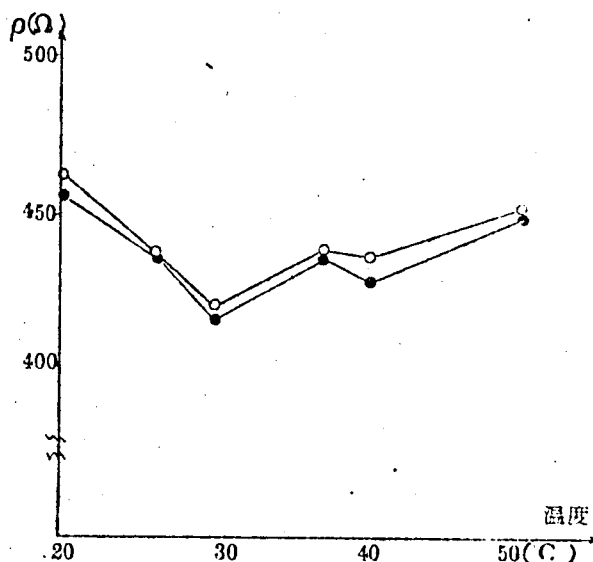
1枚の導電紙の中より6ヶ所、1ヶ所につき2枚のサンプルを作り、恒温恒湿槽を使用し、湿度60%にたもち、温度のみ  $20^\circ\text{C}$  より  $50^\circ\text{C}$  まで上昇させたが  $\rho$  はあまり変化しなかつた。

第3.3.-2図 参照

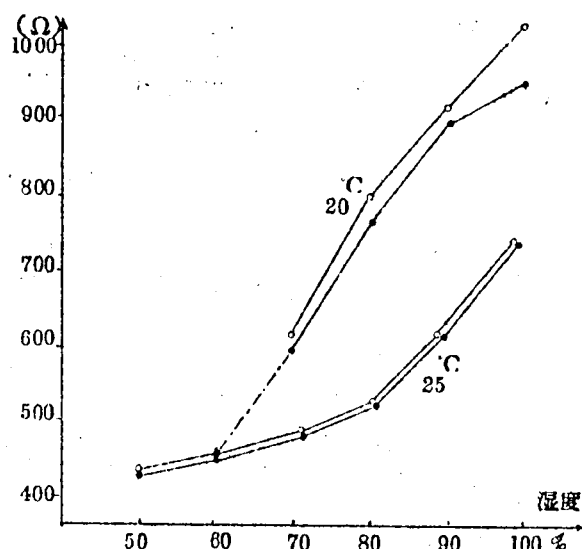
##### 4) 湿度一比抵抗特性



第3.3.-1図 比抵抗  $\rho$  のバラツキ



第 3.3.- 2 図 温度- $\rho$  特性



第 3.3.- 3 図 湿度- $\rho$  特性

温度特性のときと同じサンプルを使用し、温度を 20℃ および 25℃ にたもち、湿度を 45% より 100% まで変化させたとき比抵抗は非常に大きく変化した。第 3.3.- 3 図にその特性を示す。温度と湿度は交互作用を持つために、20℃ と 25℃ とでは湿度の影響の受けかたはことなる。③で温度の影響があまり出なかつたのは、60% の湿度のところで特性が交叉しているためと考えられる。

これらの結果より、測定は恒温恒湿の部屋でおこなうのが望ましく、また測定者はマスクをかけて導電紙に局所的な湿度変化をあたえないようにすれば、導電紙による誤差は $\sigma$ で 5, 6% 程度に押えられるものと予想される。

### 3.3.2. 導体の表現法による誤差

さきにのべたように導体はできるだけ多数の点で表現するのが望しいが、そのためにはおのづから限度がある。そこで導体の或部分（小面積）を一点で代表させたとき、その代表点よりどれだけ離れば磁束密度は忠実にあたえられるかを検討する。

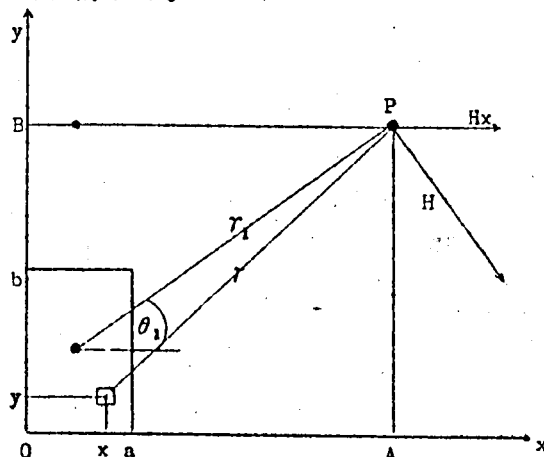
第 3.3.- 4 図のように縦  $b$ 、横  $a$  なる導体に電流  $I$  が分布して流れた場合と、導体重心位置の一点に電流が集中して流れた場合、任意の一点  $P$  における磁界の強さを比較してみる。

#### 1) 一点で表現した場合

Stokes の定理より

$$2\pi r_1 H = I$$

$$\therefore H = \frac{I}{2\pi r_1}$$



第 3.3.- 4 図 導体から離れた点の磁界

$$H_x = \frac{I}{2\pi r_1} \sin\theta_1 = \frac{I}{2\pi} \cdot \frac{(B - \frac{b}{2})}{(A - \frac{a}{2})^2 + (B - \frac{b}{2})^2} \dots\dots\dots (3.3-1)$$

2) 電流が分布している場合

$$\Delta H_x = \frac{I}{a \cdot b} \cdot \Delta x, \Delta y \cdot \frac{1}{2\pi r} \sin\theta = \frac{I}{a \cdot b} \cdot \Delta x, \Delta y \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{B-y}{(A-x)^2 + (B-y)^2}$$

$$H_x = \int_0^b \int_0^a \frac{I}{2\pi a \cdot b} \frac{(B-y)}{(A-x)^2 + (B-y)^2} dx dy$$

$$= \frac{I}{2\pi a \cdot b} \int_0^b \left[ \int_0^a \frac{B-y}{(A-x)^2 + (B-y)^2} dx \right] dy$$

$Z = A - x$  とおけば

$$\int_0^a \frac{(B-y)}{(A-x)^2 + (B-y)^2} dx = \int_{A-a}^A \frac{(B-y)}{Z^2 + (B-y)^2} dZ = \left[ \tan^{-1} \frac{Z}{B-y} \right]_{A-a}^A$$

$$\therefore H_x = \frac{I}{2\pi a \cdot b} \int_0^b \left( \tan^{-1} \frac{A}{B-y} - \tan^{-1} \frac{A-a}{B-y} \right) dy$$

$$Z_1 = A / (B-y)$$

$$Z_2 = (A-a) / (B-y) \quad \text{とすると上式は}$$

$$H_x = \frac{I}{2\pi a \cdot b} \left[ \int_{\frac{A}{B}}^{\frac{A}{B-b}} \frac{A}{Z_1^2} \tan^{-1} Z_1 dZ_1 - \int_{\frac{A-a}{B}}^{\frac{A-a}{B-b}} \frac{(A-a)}{Z_2^2} \tan^{-1} Z_2 dZ_2 \right]$$

$$= \frac{AI}{2\pi a \cdot b} \left[ -\frac{1}{Z_1} \tan^{-1} Z_1 + \frac{1}{2} \log \frac{Z_1^2}{1+Z_1^2} \right]_{\frac{A}{B}}^{\frac{A}{B-b}}$$

$$- \frac{I(A-a)}{2\pi a \cdot b} \left[ -\frac{1}{Z_2} \tan^{-1} Z_2 + \frac{1}{2} \log \frac{Z_2^2}{1+Z_2^2} \right]_{\frac{A-a}{B}}^{\frac{A-a}{B-b}}$$

$$= \frac{I}{2\pi a \cdot b} \left[ - (B-b) \tan^{-1} \frac{A}{B-b} + B \tan^{-1} \frac{A}{B} + (B-b) \tan^{-1} \frac{A-a}{B-b} \right.$$

$$\left. - B \tan^{-1} \frac{A-a}{B} + \frac{A}{2} \log \frac{A^2 + B^2}{A^2 + (B-b)^2} + \frac{A-a}{2} \log \frac{(A-a)^2 + (B-b)^2}{(A-a)^2 + B^2} \right]$$

..... (3.3-2)

実際にはどの程度の差を生ずるものかを検討するために、(3.3-1)式と(3.3-2)式の数値計算をおこなってみた。あらゆる場所における計算をすることは不可能であるので、ある特定の線上についてのみおこなった。計算を簡単にするために導体形状を正方形とし、さらに正方形の一辺の長さの $\frac{1}{2}$ を単位として長さは単位化をおこなった。分布電流の式(3.3-2)

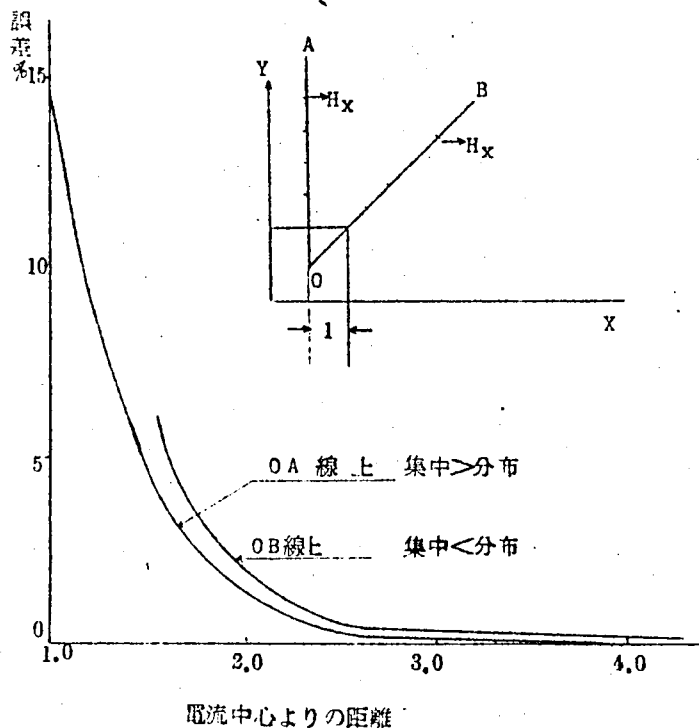
は Biot-Savart の式より誘導したものであるために、分布電流内の磁場をもとめるときには観察点における電流の影響はのぞいて検討する必要があるとて取扱が困難になるので、分布電流の存在しないところから計算を始めた。第 3.3.-5 図は計算結果であつて

1) 電流中心の垂直線上では

点電流の場合の方が常に大きい値を示す。導体寸法一辺の  $\frac{1}{2}$  離れると誤差は 1 % 程度になる。導体寸法離ればほとんど 0 である。

2) 電流中心より  $45^\circ$  の線上では

分布電流の方が大きい値を示す。導体寸法一辺の  $\frac{1}{2}$  離れると、誤差は 2 % 程度となる。垂直線上よりも一見大きいのは、導体形状が正方形であるために角の部分の影響があるためと考えられる。



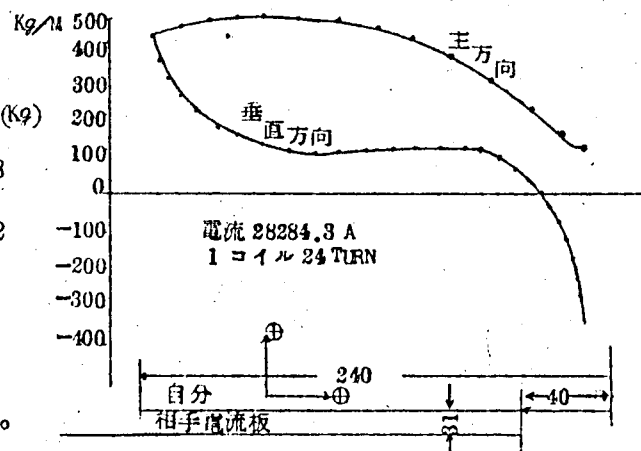
以上のことより、分布電流で表現するかわりに点電流で表現した場合、相互間の誤差は導体寸法程度離れた場所では無視できることがわかつた。

2枚の電流板が向かい合つて配置されたとき、電流板に働く垂直方向、主方向電磁力を模擬するのに、点電流の集りとしてもとめる場合の誤差に関しては電子計算機を用いて検討した。

2枚の電流板間に働く電磁力の理論解は第7章の(7.2.-10)(7.2.-24)で与えられるが、この式を巾 240, 間隔 31, ズレ 40 の2枚の電流板に適用した場合と、更に一枚の電流板を 10mmおきに 1mmの線電流 24本に分割した場合について計算した結果では(1点でもつて 10mm × 10mmを代表したことになる)

	主方向 (Kg)	垂直方向 (Kg)
板電流の理論解	9038.9	2526.8
線電流による模擬値	9037.3	2531.2

であつて、大きい方の誤差でも 0.2 % 以下であつた。故に板電流を分割して計算しても普通のコイル配置では充分精度のあることが判明した。



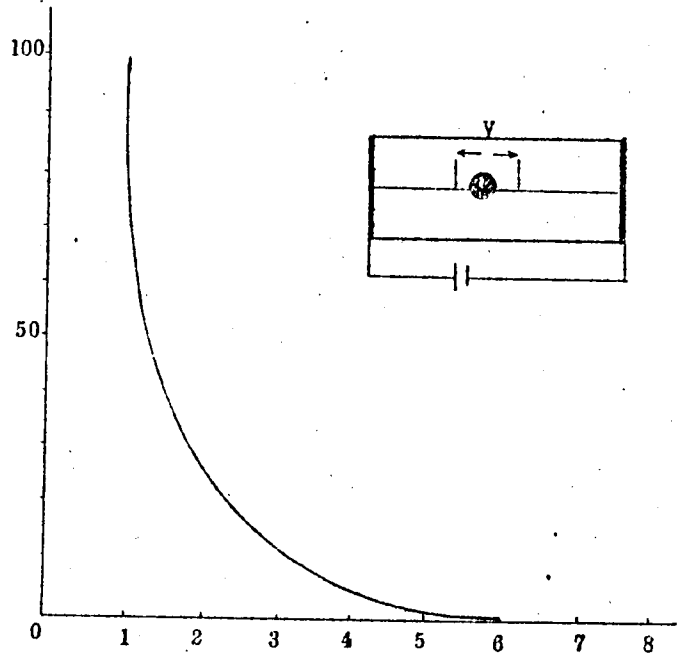
第3.3.-6図 2枚の電流板に働く電磁力の線電流による模擬

### 3.3.3. 点の大きさに基く誤差

大きさの有る導体を点で表現する場合，一点で表現すればその点より導体寸法程度離れたところの磁束密度は精度良く再現できることが理論的に証明されたが，実際に実施する場合には大きさを持たない点を書くことは不可能である。ピンの太さですら  $0.7\text{mm}$  程度あり，抵抗紙との接触を良くするために，導電ペイントを塗ると， $1\text{mm}$   $\phi$   $\sim 2\text{mm}$   $\phi$  程度の大きさとなる。

一方導体に働く電磁力の模擬をおこなう場合には，導体近傍の磁束密度を求めるわけであるが導体を表現するピンの太さは当然その近傍の電流場を乱しているのて，点の大きさが測定間隔の広さに比して無視できぬときには誤差が入ってくる予想される。極端な場合として，点の直径とブール間隔の等しいときは 100% の誤差となることよりも想像がつくことである。これらの事情を究明するために， $900 \times 500$  の原紙の中央に  $50\phi$  のペイントを塗つた円をえがき，長手方向より電圧を印加して平等電場の乱れを測定した結果，第 3.3.-7 図のよ

うな結果を得た。この結果より測定誤差を 5% 以上に押えるためにはブール間隔は点の直径の 3.5 倍程度にする必要のあることがわかる。ブール間隔をあまり大きくすると， $\partial A / \partial x$  の意味が薄れ，ブール間隔内ですでに等電流場と見なせなくなる。したがってピンを立てるときはできるだけ小さい円のペイントの中に立てることが要求される。



### 3.3.4. 板電流の表現法

ブール間隔 / 点の直径

厚みのきわめて薄い板電流の場合

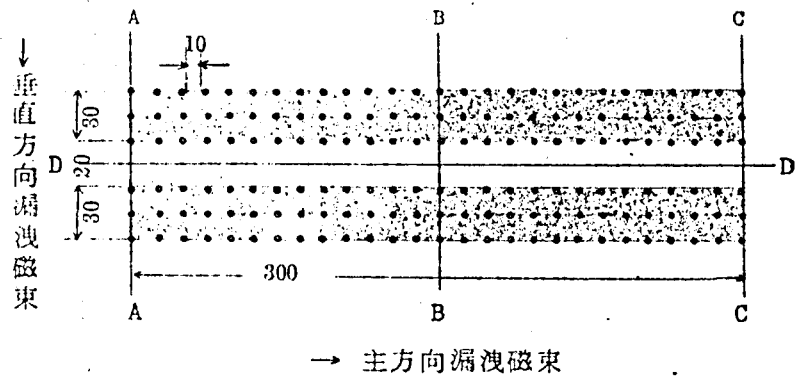
第 3.3.-7 図 点の大きさによる誤差

は一系列の点で表現すれば充分であり，点の数を多くすれば板電流を正確にあらわすことができることは 3.3.2. 項でのべたとおりである。厚みのある場合には，厚み方向にも導体を細分すればよいことは容易に想像がつくが，しかし枚数の多い変圧器などを模擬するときには実用上不可能である。そこで厚みのある板電流を，きわめて薄い板電流と考えたときどの程度の誤差が入るものであるかを，往復電流の流れる 2 枚の板電流について検討してみた。

下図において黒点・はピンであつて，板厚を考えると 1 枚のコイル厚さを 3 本のピンで表



し、板厚を考えないときは3本の中央にある1本で表した。両方のケースについてA, B, C, Dの位置で主方向漏洩磁束及垂直方向漏洩磁束の模擬をおこなった結果はつぎに示すとおりである。



第 3.3.- 8 図 板厚検討のためのモデル

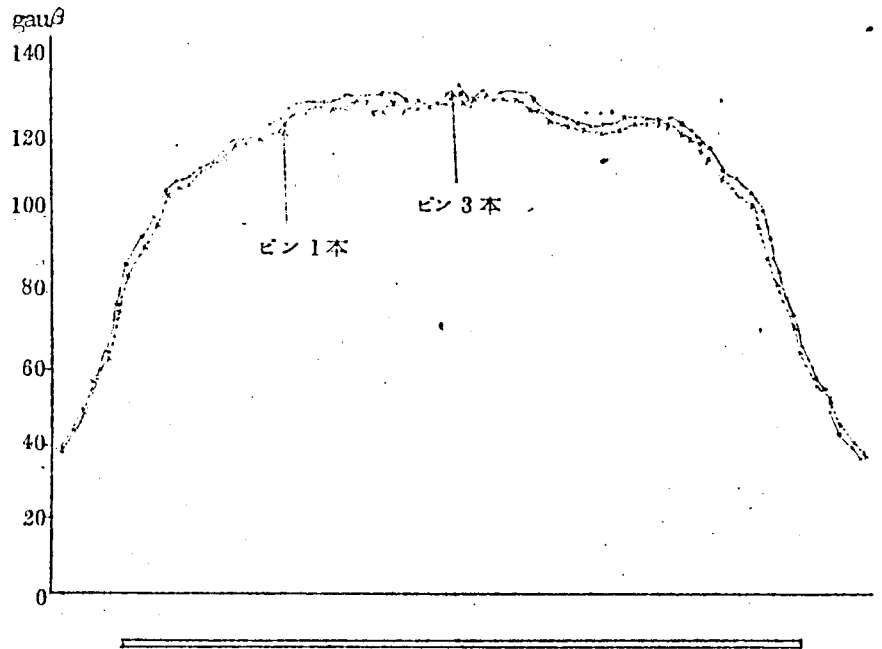
第 3.3.- 9 図 コイル間漏洩磁束 (コイル長手方向)

第 3.3.- 10 図 主方向漏洩磁束 (断面)

第 3.3.- 11 図 垂直方向漏洩磁束

これらを検討すると

- 1) コイル間主方向磁束は、1本の場合と3本の場合で差はほとんどない。
- 2) コイル断面の主方向磁束分布は、1本の場合は矩形であるに比し、3本で表わす場合は底辺が広がり三角形となる。ギャップ内の最大



値は差がない。導体と

第 3.3.- 9 図 コイル間主方向漏洩磁束 (コイル長手方向)

鎖交する磁束から電磁力を計算すると、両者間には差はみとめられない。すなわち主方向磁束に関しては、厚みのある電流板を1本で表現しても、電磁力およびコイル間磁束密度を計算するうえでは充分の精度を持つ。

- 3) 垂直方向磁束は導体上では、1本の場合は形が尖り、3本の場合よりも約15%程度大きな値を示している。(電磁力も15%の差があることになる)。ギャップ中央部においては0である。これは2本の導体の長さが等しく、そろっているためである。

### 3.3.5. 測定誤差

電磁力は次式で計算される。

$$F = \alpha \cdot s \cdot \frac{\partial V}{\partial x} \cdot I_0$$

$$= \frac{\mu_0}{\rho} \cdot \frac{\Sigma I}{i} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} I_0$$

.....(3.3.-3)

この式のなかで誤差のはいと考えられるのは、つぎの2項である。

$\rho$  : 抵抗紙の比抵抗の決定  
法

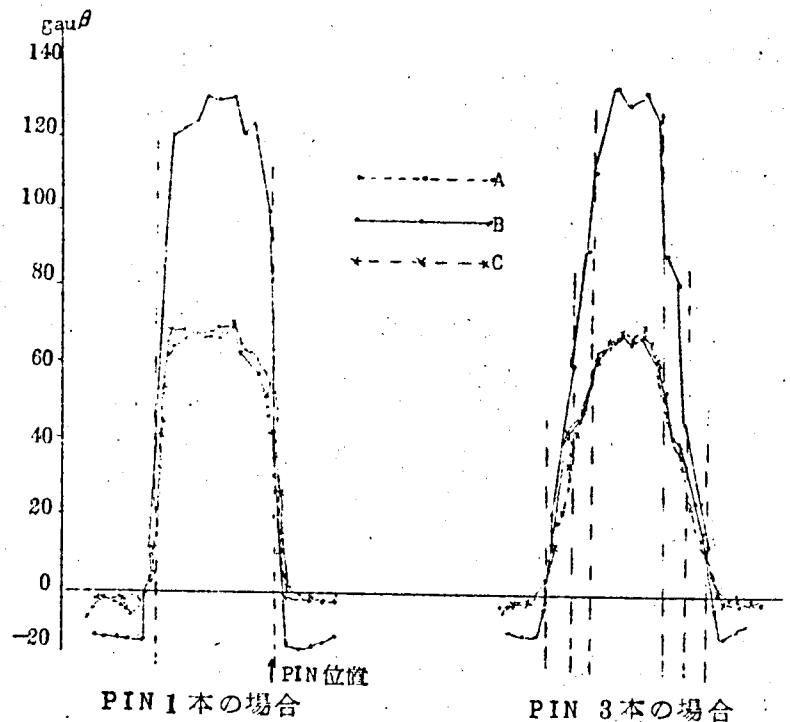
$\partial V / \partial x$  : 電流と鎖交する  
磁束密度に相当する微  
小電位差の測定法

#### A. 比抵抗の決定法

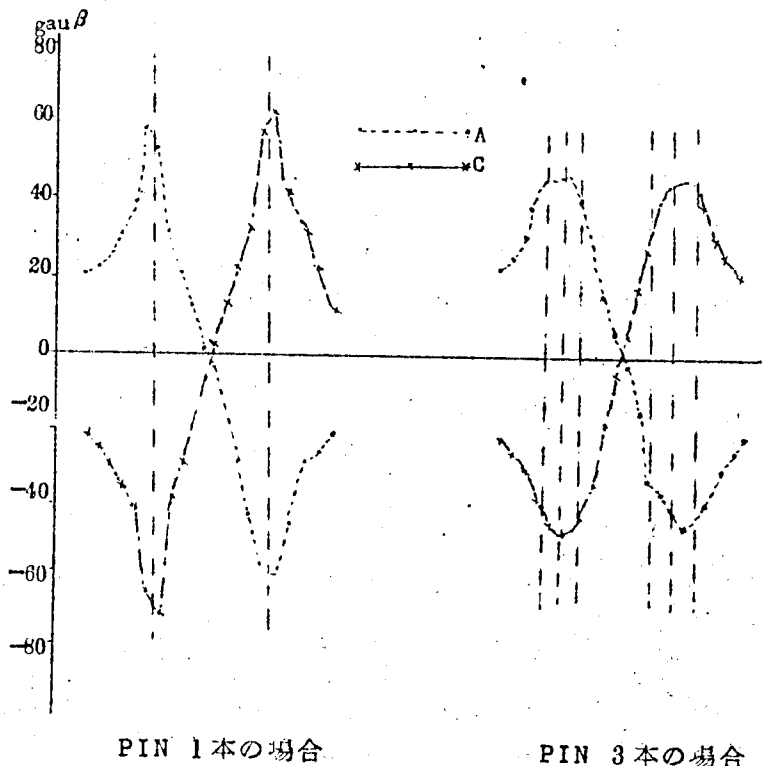
3.2.2. 具体的模擬法, 3.3.1. 抵抗紙の性質のところではい応の検討はおわっているが、実験計画法にもとづき実験をおこなった結果つぎのことがわかった。

1. 比抵抗決定のためのサンプルの大きさは十分注意して作れば  $10 \times 20$  と  $20 \times 40$  とでは差はないが、 $20 \times 40$  のほうが作りやすい。サンプルの両端の電極ペインテングは、烏口で書くときは強く押すと傷がついて比抵抗が増えたようになるが、この点に注意して書けば筆とのあいだに差はない。

2. サンプルの比抵抗を毎回測定の前後に実施するのは、模擬装置と同じ湿度、温度の影響を



第 3.3.-10 図 主方向漏洩磁束密度 (断面)



第 3.3.-11 垂直方向漏洩磁束

受けさせて、補正するのが目的である。サンプルと模擬装置とは、大きさは勿論コルク板との密着の具合もことなるので、外気の影響の受けかたに差があるかもしれないと、いろいろ実験したが差はみとめられなかった。

3. 抵抗紙は、絶乾状態より 100% 湿度の時の方が、抵抗値は 230 % 程度に大きくなる。抵抗紙に電流を通電していても、電流が 1mA/10cm 程度であれば抵抗値に変化は生じない。ピンと抵抗紙との間の接触抵抗（銀ペンを介しての）は時間とともに変化し、40 Hr で 5 % 150 Hr で 10 % 程度増加する。

抵抗紙は縦方向と横方向に比抵抗に差があることはさきにものべたとおりであるが、1枚の抵抗紙を 20 mm のメッシュに区切り、各点における抵抗を 5 mm ブループで測定した結果を整理すると、長手方向には抵抗の波打ちはないが短手方向には山、谷で 8 %、ピッチ 120 mm 程度の波打ちがみとめられる。これは、抵抗紙製作過程において、カーボン粉を長手方向にスプレイするためではないかと推定される。縦方向、横方向の差は基材である紙の性質ではなからうか。

4. 比抵抗を決定する方法としてサンプルをとる方法のほか、模擬装置をとつた残部に、半径  $r$  なる 2 個の円を画き、中心距離  $D$  を

$$D = e^{k\pi} + \log r + r$$

$$D \gg r$$

に選べば、 $k=1$  の場合  $\rho$   $k=2$  の場合  $2\rho$  が求まる。

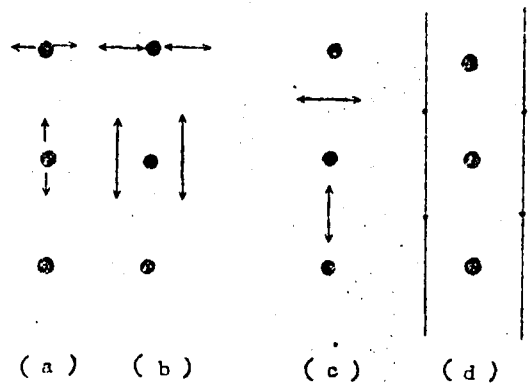
この方法によれば、サンプルと模擬装置が外気より受ける状態を、ほとんど同一にたもつことができる。欠点とする所は  $D \gg r$  の条件と、 $r$  の製図精度である。

#### B. $\partial V / \partial x$ 測定法

電磁力の計算は、ピン電流とそのピンに鎖交する磁束密度に相当する単位長さ間の電位差の積より求められるが、このとき自分自身の電流によつて作られる磁束は含まれない。この原則に忠実にしたがつて測定することは非常に困難なことである。なぜなら、自分自身の電流を流したまゝで、そのピンに鎖交する磁束を求めんとする場合には、ピンの両側のまったく等間隔の点の電位差を求めなければ自分自身の影響が入り、またこの測定法では、自分自身のピンのきわめて近傍であるために、わずかの寸法誤差が非常に大きな誤差となつて表れ、くりかえし試験の結果実用にならないことがわかつた。この方法に代る物として、着目点の電流をその都度流さないようにして測る方法も試みたが、この方法ではくりかえし精度はわりあいよいが、本来の磁束分布を多少とも曲げて測定していることになり、ピンの数が 200 本程度にもなれば実用上差支えないと考えることもできるが好ましくないので、いろいろの測定法について検

討した。

- 従来の方法
- ピンの両側の電圧の平均を求める
- ピンの中間位置の電圧を求める
- 導体寸法線上，ピン中間位置の電圧を或点を基準にして求める



これらの方法の長短を検討し，また優劣は，くりかえし精度で判断したところ，(d)の方法がも

つともよいことがわかった。この方法によれば 第 3.3-12 図 磁束密度測定法比較

- 電流をのぞくことがないのでそのための誤差はない。
  - ピン跡による効果は中間を測定するのでもつとも少ない。
  - 単位巾 (5 mm) 間の電圧を一度に測る 2 針プローブを使用しないために，測定の度ごとにピンに力を掛けて接触抵抗に変化をきたす危険度が少ない。また 2 針プローブの測定時には，2 針の接触圧力を均等にたもつことは非常に熟練を必要とするが，この方法は 1 針法であるので簡単である。
  - 主方向，垂直方向同時に測定できる。
- 以上が長所であるが欠点としてはつぎのことが掲げられる。
- 測定点を決定するときに製図精度をよくしなければならない。しかしこれは 2 針法と同じ程度の誤差である。
  - ある点を基準にして電圧を測定し，相隣れる値の差を求めるので，計測精度をよくする必要がある。(計数形電圧計で解決できる)

くりかえし精度は(a)の方法が  $\pm 10\%$  程度あるのに比し(d)では

主方向  $\sigma = 4\%$       垂直方向  $2\%$       であつた。

このほか一連の検討の結果わかつたことは，ピンの接触抵抗は時間とともに変化するので，模様を作つたらできるだけ早く，24Hr 以内に測定したほうがよい。また 2 針プローブを使用するときは，個人差があらわれる。目と手先との相対関係で垂直と思つていても常に斜に計る傾向がある。

### 3.4. 三次元像の二次元による解析

#### 3.4.1. 2枚のコイルによる測定結果

模擬をおこなうにあたり、実物を作ることなしにいかにして忠実に実物の再現をおこなうかということがもつとも重要なことであるが、実用上の観点に立つて考えると、模擬装置はあらゆる点で実物の再現である必要はない。過去の経験などによりすでにわかっている点、使用材料のバラツキの範囲にはいるものなどをすべて検討することは不経済であり、技術的に検討して重要と思われるところ、構造上ちがった性質をあらわすであろうと予測される場所について考えるのが普通である。

変圧器は三次元構造物であつて、いままでに展開してきた抵抗紙模擬は、二次元の問題しか解き得ない。しかし上記のような観点に立つて考えれば、じゅうぶん有効な情報を入手できるものと考えられる。漏洩磁束の模擬をおこなうのは、この点の検証をおこなうのが最終目的であるが、予備試験として、2枚のコイルよりなる空心変圧器を用いて、三次元を二次元で模擬する問題の検討をおこなった。

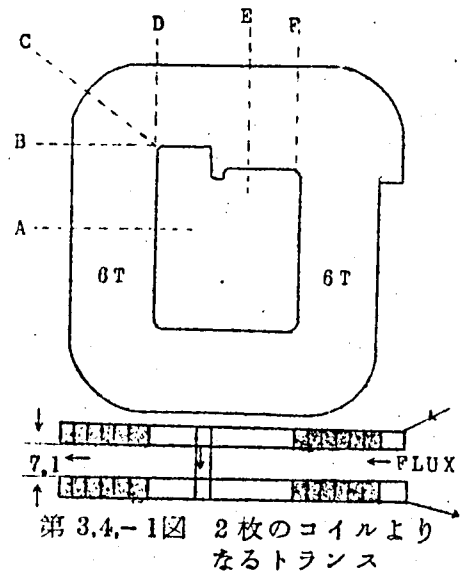
コイルはモデル変圧器の低圧コイルを2枚ギャップをたもってかさねあわせ、逆直列に接続した。このようにすると鉄心がなくても一次二次のATは平衡し、理想変圧器を構成することになり、鉄心がないために取り扱い組立がきわめて簡単で、漏洩磁束電磁力の検討をおこなう装置としてはきわめて有効な方法である。

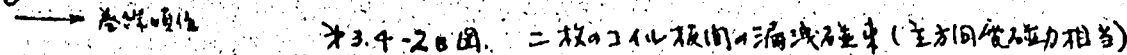
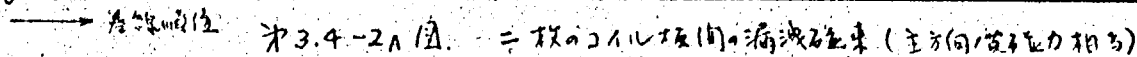
第3.4.1.図は試験装置の基本図である。使用したコイルはモデル変圧器の#2コイルである。このコイルは鉄心内に相当する箇所では巻数は6Tであつて、つなぎのところは図のようになつている。(実物トランスとはつなぎの形は多少こととなるが、余りターンの現象を調べるのには等価である。)

1ターンは5層よりなり、1層は3本の導線の平行よりなつている。したがって図中Aの部分の外観は、30本×3の導体が走っていることになる。

漏洩磁束の測定にあたっては5.0Aの交流電流を流し、7.1mmのギャップの間の磁束をホールジェネレーターと微小交流電圧計を組合わせて測定した。

測定箇所は第3.4.-1図のA, B, C, D, E, Fの位置であつて、方向は主漏洩磁束の方向、すなわちギャップ中央位置で、コイルを含む平面に平行な面内であつて、巻線に直角な





方向である。たとえばAの位置では矢印方向の磁束である。A～Fの6つの位置は、ことなつた漏洩磁束を示すであろうと考えられる代表的位置である。測定結果は第3.4-2図に示すとおりである。横軸の番号はA部におけるコイル最内側を1番として居る。E, Fにおいては-5より始まる。

#### A 部

コイル長手の中央に位置し、二次元で模擬するときは最も良い近似を得られるであろうと考えられる場所であつて、山の形は左右対称である。山の形が小さく波打っているのは1ターンが5層の平行よりなっているが、各層に等しい電流が流れず、多少の差があるためであろう。模擬との比較はあとで行なりが、よい一致を示している。

#### B 部

コイル長手の終端に位置する。定性的に考えるとAB間の電流は主方向漏洩磁束に貢献しているが、BからC, Dの間は円弧を画いて曲っているために余弦函数的に影響は減少するものと考えられる。特に内コーナーにおいてはほとんど直角に曲るために、Bより後の電流はまったく作用していないと考えられる。このことは第3.4-2図のB曲線にもよく表れている。すなわち内コーナー側（グラフ上では左端）では漏洩磁束レベルはA曲線に比してかなり低く、外周に向うにしたがってだんだん差は少なくなっているが全般に低目である。

#### C 部

円弧部の代表的位置である。測定結果は最内周近辺においてAよりも低い、そのほかは大差なく出ている。

#### D 部

短手の端部となっている。もしBと差があらはれるとすると、それは直線部の長短の影響であるが、ほとんど似かよつた値であることから、直線部はある程度有れば同じような結果を与えることがわかる。Aに比し内側の磁束レベルの低い点はBに同じ。

#### E 部

短手直線部の中央付近で、Aに比し1ターン多い効果が明瞭に認められる。この部分は直線部の中央とはいえ、直線部の長さはきわめて短いのであるが、Aと比較して大差はない（多少低目）。

#### F 部

Dに比し、1ターン殖えた端部である。1ターン殖えた影響はEと同様認められる。

以上の結果を総合してみると

- 1) ある程度直線部があれば漏洩磁束はほとんど変らない。逆に考えれば、無限に長い直線部分の漏

洩磁束と有限長の中央部では大差ないから、三次元像を二次元で考えても大きな誤りがない。

2) 円弧部では、内側は直線部分よりは相等低くなるが、外周ではほとんど変りがない。

すなわち三次元の現象を解くとき、任意の断面を取ってその場所の二次元像を作って考えれば相当の精度で答が得られることが推測される。

2枚のコイルが短手方向にずれたときの測定結果では先の場合と異なり、小さな波打ちがみとめられない。これはずらせたために上下2枚のコイルの1ターン内の電流差による漏洩磁束の差が打消しあつたためであろうと考えられる。全体の傾向としては2枚の間にズレのない場合によく似ている。

以上のほか、高圧#3コイル2枚を使用して同様の試験をくりかえしたが、同じ結果をえた。さらにまた2枚のコイル間隔を広げた場合について測定したところ、長手直線部と短手直線部の差が広まってくることがわかった。このことは、漏洩磁束を測ろうとしている点から見た直線部の両端に開く角度が影響していることを示唆している。

主方向漏洩磁束の測定のほかにこれに直角な成分の測定も行なったがこの成分はギャップの位置によって大きく変わるので、ホールゼネレーターの位置づけをよほど精度よくおこなわないと信頼できる値はえられない。われわれの場合もあまり完全な結果をえていないのでグラフの提示はさしひかえる。

### 3.4.2. 三次元を二次元で推定するときの誤差

2枚のコイルの漏洩磁束の実測結果より、直線部がある程度長ければ二次元で推定しても誤差は少ないだろうと推定された。この点を理論的に扱ってみる。

第3.4-3図において、有限長の直線電流より離れた

P点の磁界Hは、Biot-Savartの式より求められる。

導体の素線  $d\ell$  によるP点の磁界  $dH$  は

$$dH = \frac{1}{4\pi} \frac{I d\ell \sin\theta}{r^2} = \frac{1}{4\pi} \frac{I d\ell \cos\beta}{r^2}$$

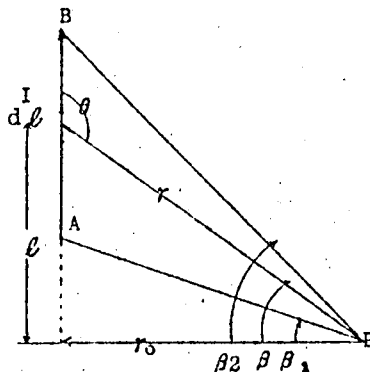
右図の定義に従い

$$\ell = r_0 \tan\beta$$

$$d\ell = r_0 \sec^2\beta d\beta$$

$$d\ell \cos\beta = r d\beta$$

$$\therefore dH = \frac{I}{4\pi} \frac{d\beta}{r} = \frac{I}{4\pi r_0} \cos\beta d\beta$$



第3.4-3図 有限長の電流による磁界

$$H = \frac{I}{4\pi r_0} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \cos\beta d\beta = \frac{I}{4\pi r_0} (\sin\beta_2 - \sin\beta_1) \dots\dots\dots (3.4-1)$$



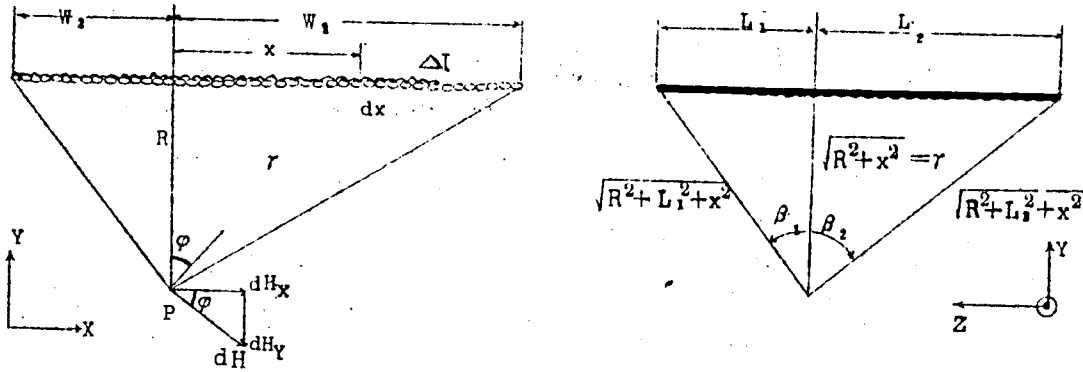
ここで  $\beta_1, \beta_2$  は導線の両端と P 点を結ぶ直線が, P 点から AB に下した垂線となす角である。

$\beta_1 = -\frac{\pi}{2}, \beta_2 = \frac{\pi}{2}$  とすれば無限長の場合になり

$$H = \frac{I}{2\pi r_0}$$

となる。

つぎに有限長の電流板から離れた点 P における磁場を求める。



第 3.4-4 図 有限長の電流板による磁界

$dx$  なる素線より P 点に誘起される磁界は (3.4-1) 式より

$$dH = \frac{\Delta I}{4\pi r} (\sin\beta_2 - \sin\beta_1) \dots \dots \dots (3.4-2)$$

電流素線は Z 軸に平行であるから磁界は X, Y の成分を持つことになり, 各々が着目する素線を移動させると変わるわけであるから, 電流板によって生じる磁界の計算は,  $dH$  を X, Y の成分に分けて積分する必要がある。

$$dH_x = dH \cos\varphi = \frac{\Delta I}{4\pi r} (\sin\beta_2 - \sin\beta_1) \cos\varphi$$

$$dH_y = dH \sin\varphi = \frac{\Delta I}{4\pi r} (\sin\beta_2 - \sin\beta_1) \sin\varphi$$

$$\begin{aligned} \text{一方} \quad \sin\beta_1 &= \frac{L_1}{\sqrt{R^2 + L_1^2 + x^2}} & r &= \sqrt{R^2 + x^2} \\ \sin\beta_2 &= \frac{L_2}{\sqrt{R^2 + L_2^2 + x^2}} \\ \cos\varphi &= \frac{R}{\sqrt{R^2 + x^2}} \\ \sin\varphi &= \frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}} \end{aligned}$$

$$\therefore H_x = \frac{\Delta I}{4\pi} \int_{W_2}^{W_1} \frac{1}{\sqrt{R^2 + x^2}} \left( \frac{L_2}{\sqrt{R^2 + L_2^2 + x^2}} - \frac{L_1}{\sqrt{R^2 + L_1^2 + x^2}} \right) \frac{R}{\sqrt{R^2 + x^2}} dx \dots (3.4-3)$$

$$H_y = \frac{\Delta I}{4\pi} \int_{W_2}^{W_1} \frac{1}{\sqrt{R^2 + x^2}} \left( \frac{L_2}{\sqrt{R^2 + L_2^2 + x^2}} - \frac{L_1}{\sqrt{R^2 + L_1^2 + x^2}} \right) \frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}} dx \dots (3.4-4)$$

一般公式として

$$\int \frac{dx}{(x^2+p^2)\sqrt{ax^2+c}} = \frac{1}{p\sqrt{c-ap^2}} \tan^{-1} \left( \frac{x}{p} \sqrt{\frac{c-ap^2}{ax^2+c}} \right)$$

$$\int \frac{x dx}{(x^2+p^2)\sqrt{ax^2+c}} = \frac{1}{2\sqrt{c-ap^2}} \ln \left| \frac{\sqrt{ax^2+c} - \sqrt{c-ap^2}}{\sqrt{ax^2+c} + \sqrt{c-ap^2}} \right|$$

但し  $c > ap^2$  の場合

が与えられている。この積分を用いると

$$\begin{aligned} H_X &= \frac{\Delta I}{4\pi} \left( \int_{W_2}^{W_1} \frac{L_2 R}{(x^2+R^2)\sqrt{x^2+(L_2^2+R^2)}} dx - \int_{W_2}^{W_1} \frac{L_1 R}{(x^2+R^2)\sqrt{x^2+(L_1^2+R^2)}} dx \right) \\ &= \frac{\Delta I}{4\pi} \left( \frac{L_2 R}{R \cdot L_2} \tan^{-1} \left( \frac{x}{R} \frac{L_2}{\sqrt{x^2+(L_2^2+R^2)}} \right) - \frac{L_1 R}{R L_1} \tan^{-1} \left( \frac{x}{R} \frac{L_1}{\sqrt{x^2+(L_1^2+R^2)}} \right) \right)_{W_2}^{W_1} \\ &= \frac{\Delta I}{4\pi} \left[ \tan^{-1} \frac{x}{R} \frac{L_2}{\sqrt{x^2+L_2^2+R^2}} - \tan^{-1} \frac{x}{R} \frac{L_1}{\sqrt{x^2+L_1^2+R^2}} \right]_{W_2}^{W_1} \dots \dots (3.4-5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_Y &= \frac{\Delta I}{4\pi} \left( \int_{W_2}^{W_1} \frac{L_2 x}{(x^2+R^2)\sqrt{x^2+(L_2^2+R^2)}} dx - \int_{W_2}^{W_1} \frac{L_1 x}{(x^2+R^2)\sqrt{x^2+(L_1^2+R^2)}} dx \right) \\ &= \frac{\Delta I}{4\pi} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{x^2+L_2^2+R^2} - L_2}{\sqrt{x^2+L_2^2+R^2} + L_2} - \frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{x^2+L_1^2+R^2} - L_1}{\sqrt{x^2+L_1^2+R^2} + L_1} \right]_{W_2}^{W_1} \\ &\dots \dots \dots (3.4-6) \end{aligned}$$

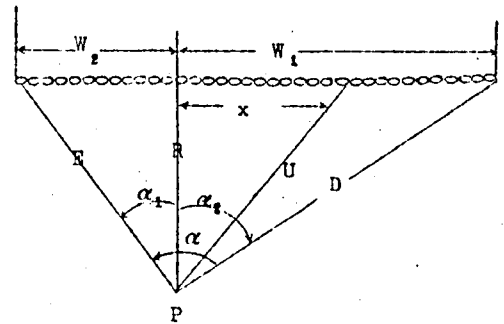
一方導体長さが無限の場合を計算してみるに、(3.4-2) 式の  $\beta_2 = \pi/2$   $\beta_1 = -\pi/2$  の場合に相当するから、(3.4-3)、(3.4-4) 式では  $L_2 = \infty$   $L_1 = -\infty$  となり

$$H_X = \frac{\Delta I}{2\pi} \int_{W_2}^{W_1} \frac{R}{R^2+x^2} dx \dots \dots \dots (3.4-7)$$

$$H_Y = \frac{\Delta I}{2\pi} \int_{W_2}^{W_1} \frac{x}{R^2+x^2} dx \dots \dots \dots (3.4-8)$$

無限導体より構成される無限平面であるので、着目点Pをふくみ、板電流に垂直な断面で切った図を考え、P点より電流板の両端までの距離をD、Eとし、Pより両端をながめる時の開き角を $\alpha$ とすると

$$\begin{aligned} H_X &= \frac{\Delta I}{2\pi} \int_{W_2}^{W_1} \frac{R}{R^2 + x^2} dx \\ &= \frac{\Delta I}{2\pi} \left[ \frac{R}{R} \tan^{-1} \frac{x}{R} \right]_{W_2}^{W_1} \\ &= \frac{\Delta I}{2\pi} \left[ \tan^{-1} \frac{W_1}{R} - \tan^{-1} \frac{W_2}{R} \right] \end{aligned}$$



第3.4-5図 無限長電流板による磁界

$$= \frac{\Delta I}{2\pi} (\alpha_2 - \alpha_1) = \frac{\Delta I}{2\pi} |\alpha| \quad \dots\dots\dots (3.4-9)$$

$$H_Y = \frac{\Delta I}{2\pi} \int_{W_2}^{W_1} \frac{x}{x^2 + R^2} dx$$

$$u^2 = x^2 + R^2 \quad \text{とおくと} \quad 2u \, du = 2x \, dx$$

$$\therefore H_Y = \frac{\Delta I}{2\pi} \int_E^D \frac{u}{u^2} du = \frac{\Delta I}{2\pi} \ln \left( \frac{D}{E} \right) \quad \dots\dots\dots (3.4-10)$$

ゆえに、有限長の板電流によつて誘起される磁界と、無限長の板電流によつて生じる磁界との差は、(3.4-9)、(3.4-5)及(3.4-10)、(3.4-6)を比較すれば求まる。これはとりもなおさず三次元を二次元で模擬したときの精度をあたえることになる。

電子計算機を用いて1例について計算してみる。

コイル巾：基準長さとして1

導体方向には中央を考える  $L_1 = -L_2 = 1.5$

板電流からの垂直距離  $R = 0 \sim 10$

コイル巾方向には端からコイル巾分～中央(W)

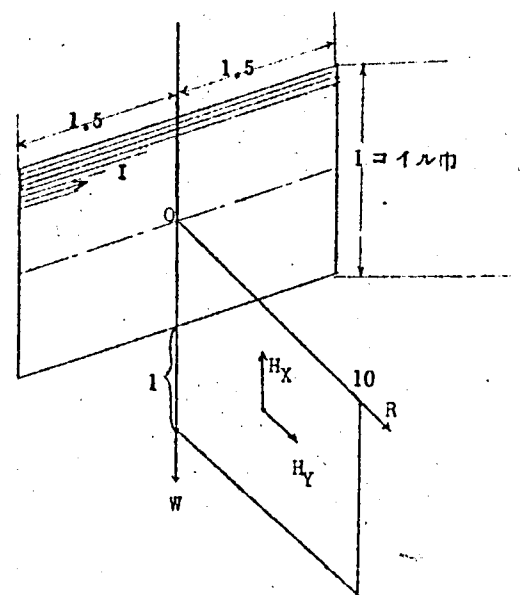
2枚のコイルのギャップにおける漏洩磁束では

$$L = 1.75$$

$$R = 0.056$$

であつてじゅうぶんの範囲にある。

計算結果を図示すると次図のようになる。



第3.4-6図 計算範囲

この図は、主方向 ( $H_X$ ) および垂直方向 ( $H_Y$ ) 電磁力相当磁界の強さを、有限長および無限長の電流板の近傍で計算したときの両者の差を、有限長磁界で割って相対誤差を求めた物であるが、これよりつぎのことがわかる。

1. 電流板よりの距離が近ければ近いほど有限長を

無限長で検討したときの誤差は小さくなる。

2.  $H_X$  は電流板中央に近いほど精度がよく、 $H_Y$  は端ほどよい。

3. 大略の概念としては、電流板巾の  $1/10$  以下のところでは誤差は  $1 \sim 5\%$  である。

4. 有限長電流板よりの磁界は第 3.4 - 8 図に示すとおりであるが、 $H_X$  は中央ほど値が大きく  $H_Y$  は端ほど大きい。また電流板よりの距離が離れると大きさは急激に減少する。そこで距離が離れると、有限長と無限長との差の相対誤差は大きくなるが、絶対値の差は小さい。

5. したがって変圧器のように有限長コイル板が多数枚より形成されているものの任意の点の磁界を、無限長コイルとして計算してもじゅうぶんの精度をもつことがわかる。

以上は導体長さが有限のための誤差検討であったが、このほかにコーナー部の問題がある。コーナー部は、デカルト座標で考えるよりも円筒座標で考えるべきであろう。ベクトルポテンシャルに関して成立するポアッソンの式は、円筒座標では

$$\frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{\mu r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_\theta) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{1}{\mu r} \frac{\partial}{\partial z} (r A_\theta) \right\} = -i_\theta \quad \dots\dots\dots (3.4-11)$$

抵抗紙模擬では、 $\rho = \mu = \text{const}$  であるから上式を変形して

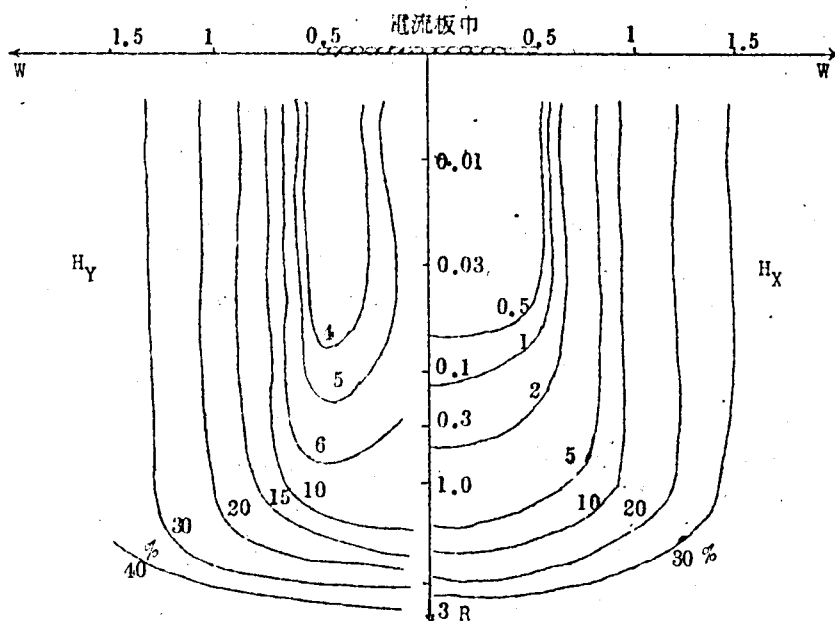
$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_\theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{A_\theta}{\mu r} \right) = -i_\theta \quad \dots\dots\dots (3.4-12)$$

一方、デカルト座標では

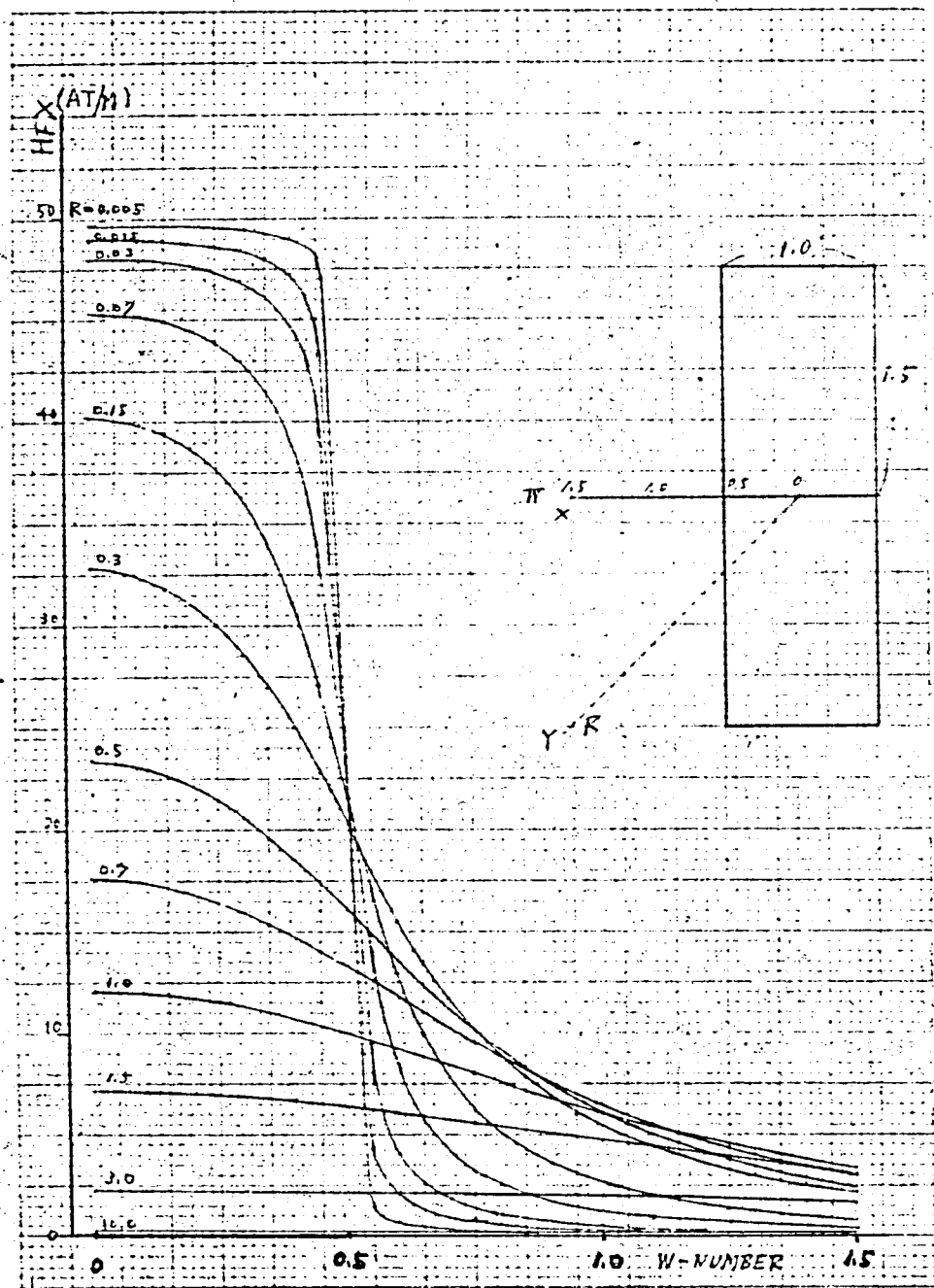
$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -i(x, y) \quad \dots\dots\dots (3.4-13)$$

となり、 $x : r$ ,  $y : z$  の対比をとると、 $\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{A_\theta}{\mu r} \right)$  がデカルト座標で円筒座標を代用したと

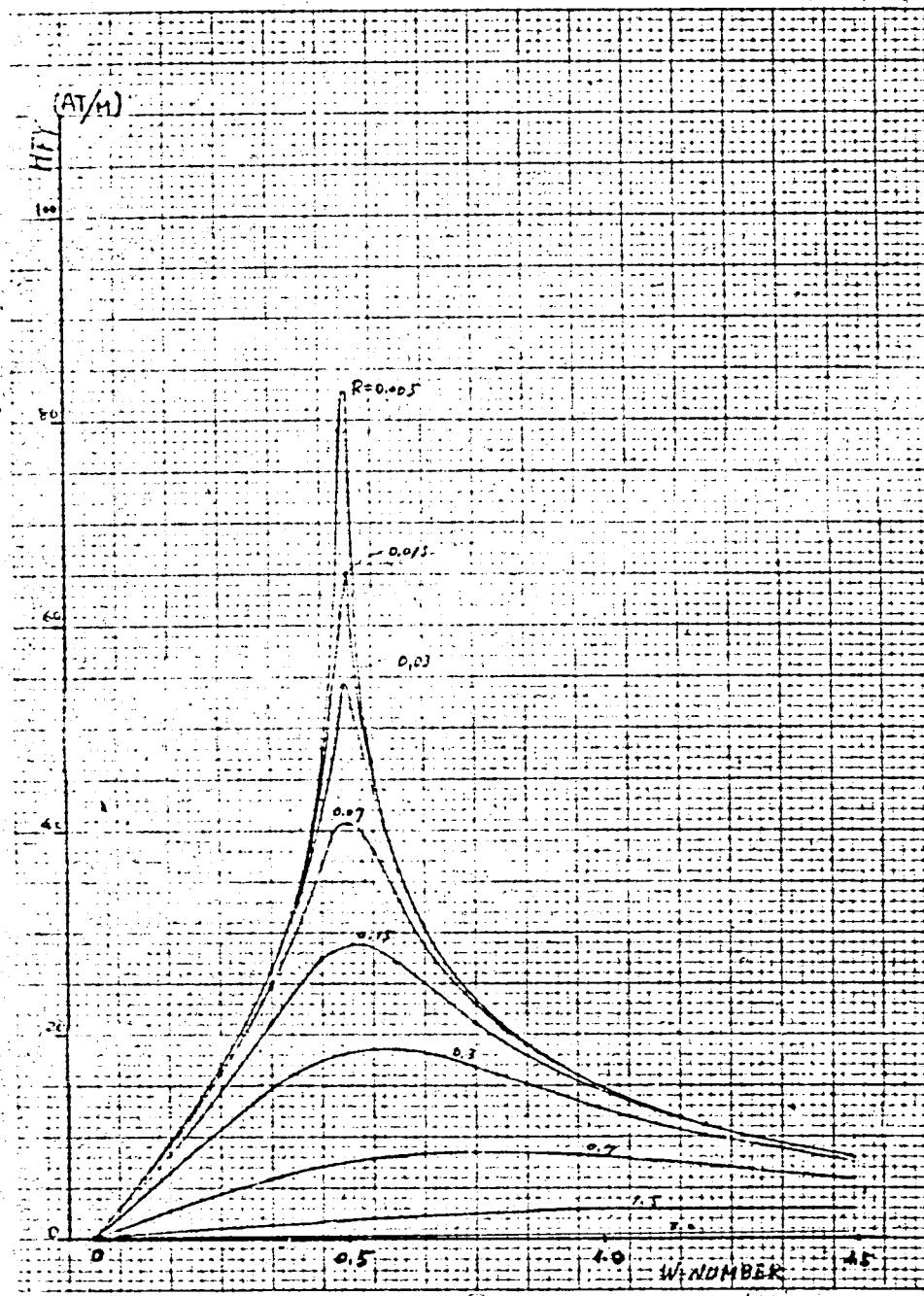
きの誤差となる。従って、 $r$  が小さい所程誤差が大きくなることが推測される。



第 3.4 - 7 図 有限長と無限長の誤差



※3.4-8A図 有限な時の境界線 (X成分)  
HFX-W (Parameter R)



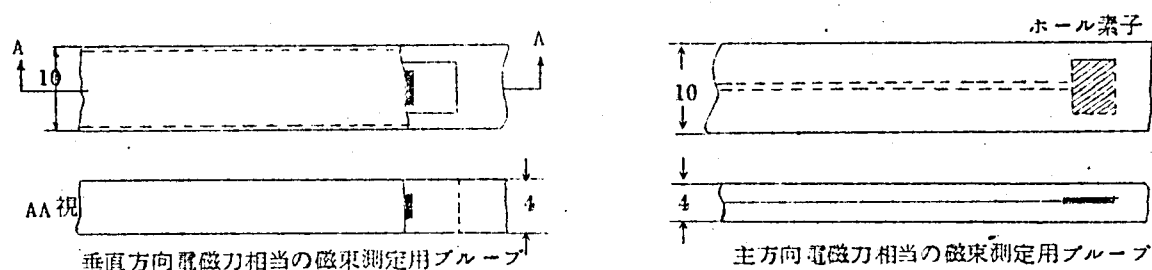
※3.4-8B図 有限な時の境界線 (Y成分)  
HFY-W (Parameter R)

## 3.5. モデル変圧器の漏洩磁束

## 3.5.1. 漏洩磁束の測定

モデル変圧器を作成するにあたって、短絡試験時に電磁力を測定できるような構造にしてあることは第2章において述べたが、そのほかに、漏洩磁束を測るホールセンサを挿入できるように、カルタの一部をけずりおとしてある。

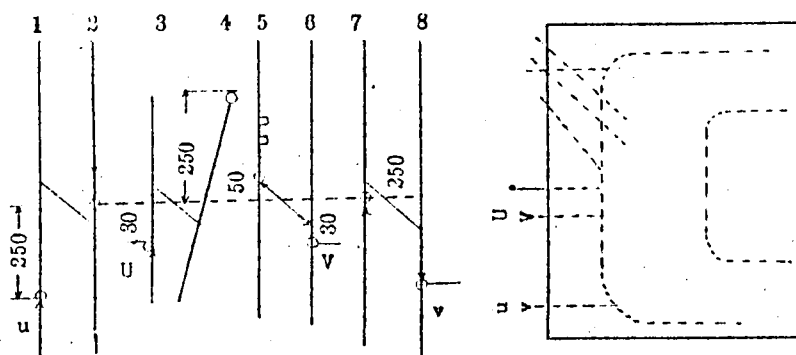
標準構造ではカルタは千鳥に貼ってあるために、油道もデグザグになっており、コイルエンドの上部から真直に鉄芯まで到達する溝はないが、このモデル変圧器では、邪魔になるカルタは割溝をもうけて先端にホール素子をつけた巾10mm厚さ4mmの棒がはいるようにした。



第3.5.-1図 磁束計プローブ

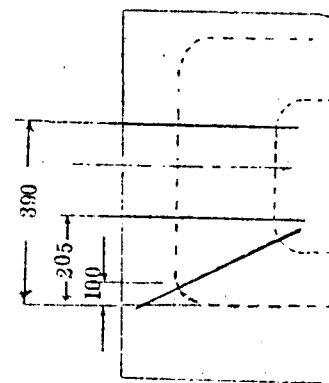
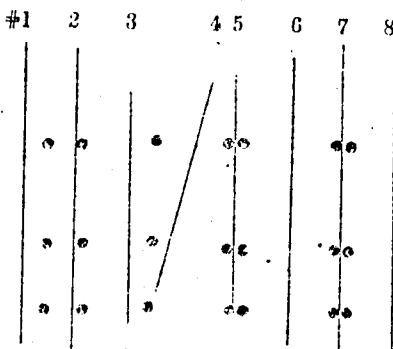
測定に使用したホール素子使用の磁束計プローブの構造は、上図のとおりである。測定は変圧器の低圧側を短絡し、高圧側よりAC100Vを印加しておこなった。電流100A。ホール素子の出力電圧は、漏洩磁束のように数百gaussのところではmVオーダーであるので、誘導の問題にはとくに留意する必要がある。電圧計には横河製VM-11形微小交流電圧計を使用した。ホール素子には不平衡電圧があるが、AC電圧計を使用すると、この電圧をキャンセルする方を構する必要がなく便利である。ただ交流電圧計だけでは磁束の位相関係がわからないのでVM-11で増巾後の波形を電源同期のかかったシンクロスコープに入れて、位相の正逆をチェックした。

変圧器コイルの構造は左右対称ではない。鉄心の中および下部コイルエンドは対称であるが上部コイルエンドはコイル間リードの渡りがあるために左右は非対称である。第3.5.-2図はこの状況を示すものである。短絡試験時、コイルに働く電磁力は上部コイルエンドで測



第3.5.-2図 コイルつなぎ図

定するように計画が進められて  
 いるので、漏洩磁束の測定  
 も上部コイルエンド部でおこ  
 なうことにした。磁束測定用  
 の溝は、コイルのR部（なな  
 め）、左半分の中央、右半分  
 の中央の3本が切っており、



コイルとの関係位置は右図の

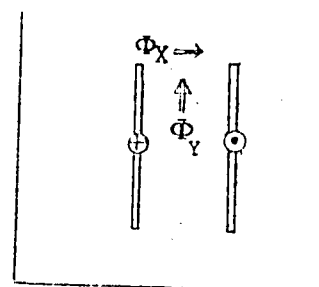
第 3.5.-3 図 漏洩磁束測定場所

とおりである。測定をコイル間中央でおこなうことができた場合と、できずにコイル面に沿って測った場合がある。

磁気的条件はタップ位置によって大巾に変わるので、最高タップと最低タップの両方について実施した。測定ケースはつぎの6ケースである。

1. コイルエンド上部 左辺, 最高タップおよび最低タップ
2. コイルエンド上部 右辺,                   〃                   〃
3. コイルエンド上部 斜め,                   〃                   〃

測定結果の1例を第 3.5.-4 図に示す。グラフは、主方向電磁力相当 FLUXと垂直方向電磁力相当 FLUX とに分けてあるが、その方向は右図のような場合



$\Phi_Y$  : 主方向電磁力相当 FLUX

$\Phi_X$  : 垂直方向 電 磁力相当 FLUX

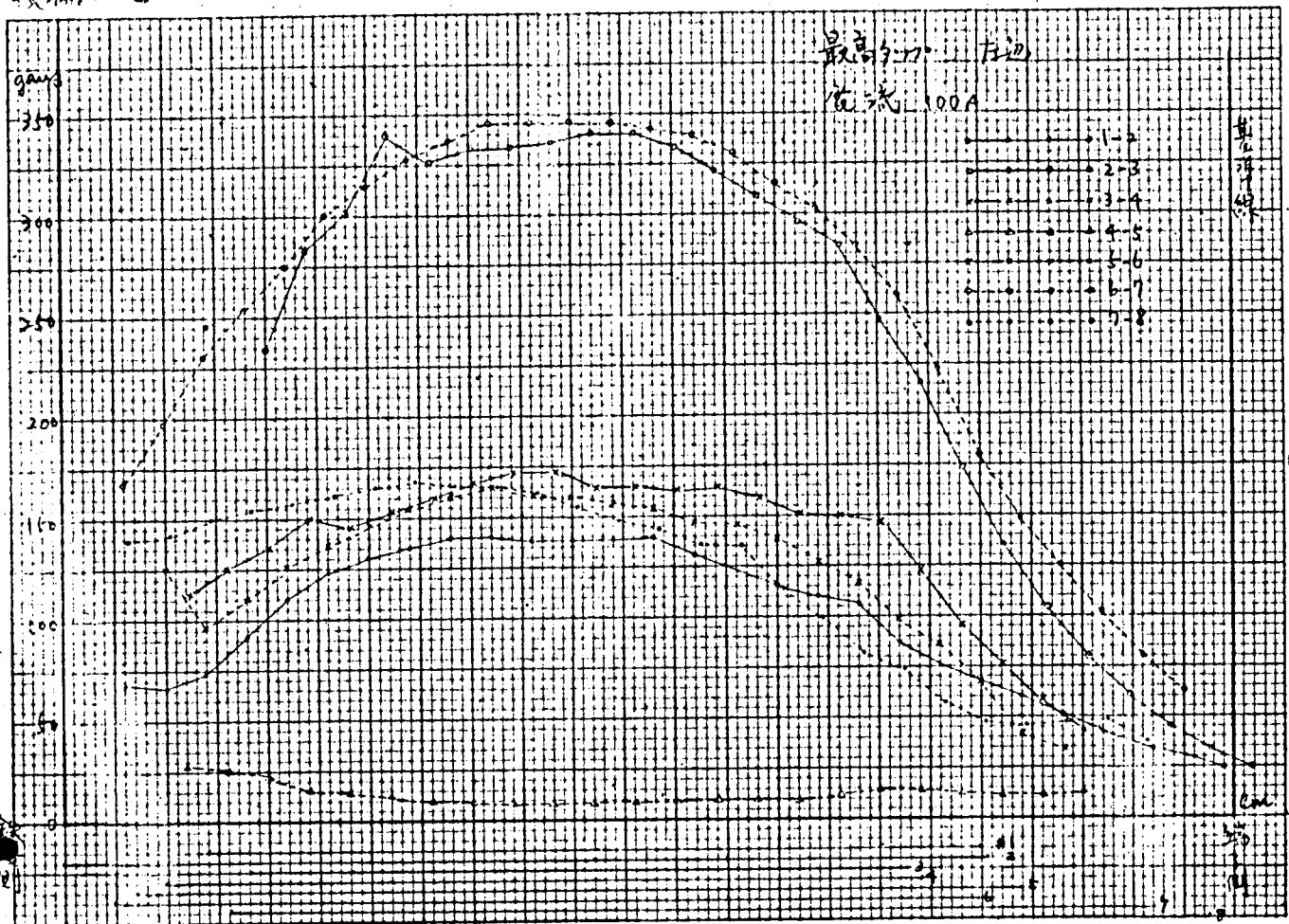
第 3.5-5 図 漏洩磁束の方向

と称している。電磁力は漏洩磁束と電流とのベクトル積になるために、方向が  $90^\circ$  ズレるわけである。グラフにおいては  $\Phi_Y$  に対する符号は省略して絶対値で記載している。 $\Phi_X$  は符号を考えてある。コイル位置は各グラフとも8本の線で記入した。これらの結果を比較検討するとつぎのことが言いうる。

1. 当然のことながら、高圧低圧コイル間の主方向磁束密度は一番高く、高圧巻線電流 100A で 350 ガウス程度である。この変圧器の定格電流は最高タップで 152A であるから、定格運転時の漏洩磁束密度は 530 ガウス程度である。最低タップのときも大差ない。短絡時には直流分いっぱいに入るとして

$$B \text{ (短絡時)} = 530 \times \frac{100}{4.2} \times 2.5 = 31,600 \text{ ガウス (波高値)}$$

と驚くべき大きさとなる。

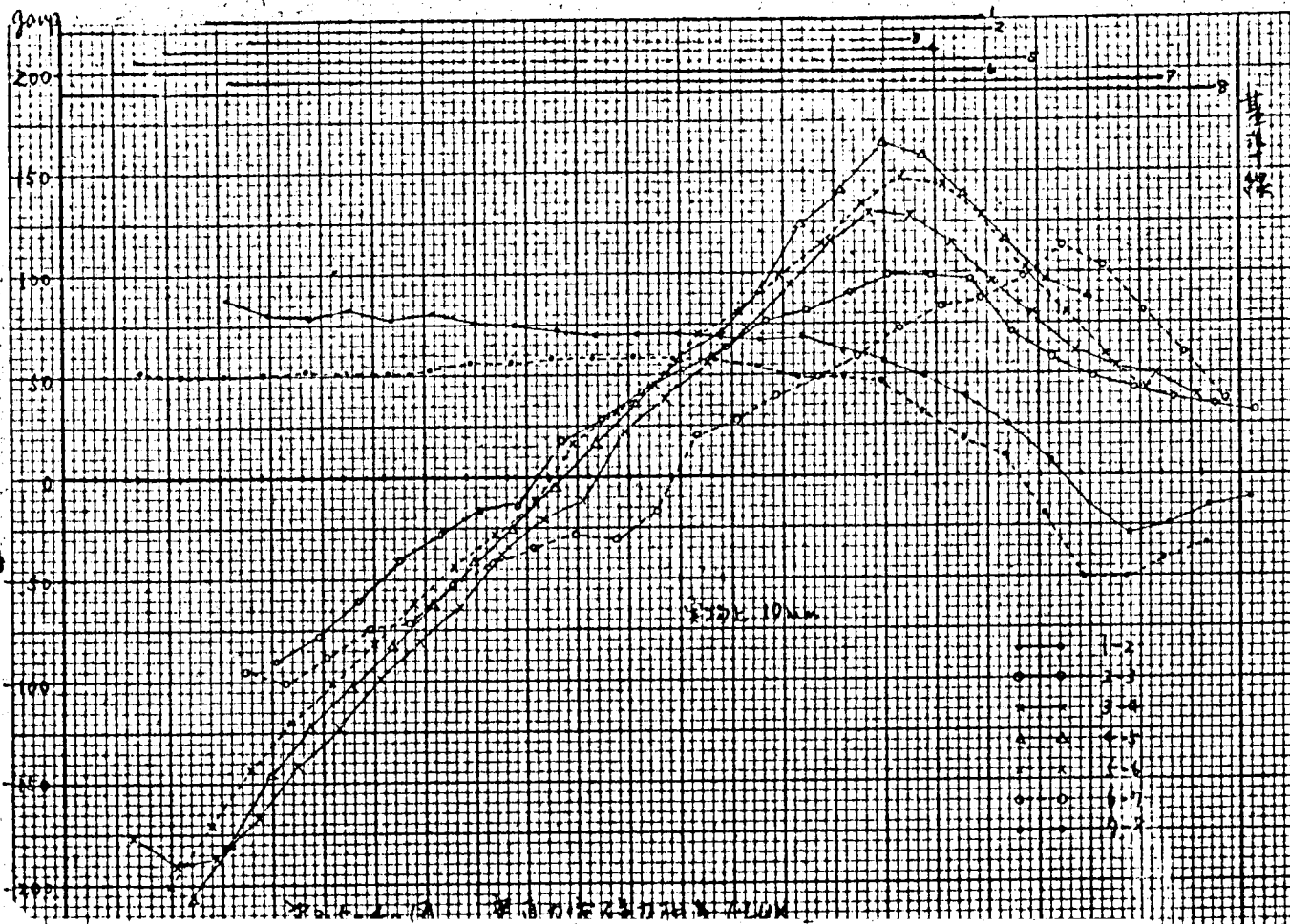


NO. 402C

BRAND (C) SEIJI

A4 二色目方線紙

※3.5-4A 主方向光強度相当 FLUX (実測)



NO. 402C

BRAND (C) SEIJI

A4 二色目方線紙



低圧コイル#1～#2間はほぼ $\frac{1}{2}$ に減少し予想のとおりである。高圧コイルの#3～#4、#5～#6間も $\frac{1}{2}$ 程度であり、磁氣的中央にある#4～#5間はほとんど0である点もうなづける。ただしこれはコイル巾中央付近についていえることで、端ちかくでは磁束密度が漸減していき、垂直方向成分にかわる。すなわち磁力線が彎曲していくためである。

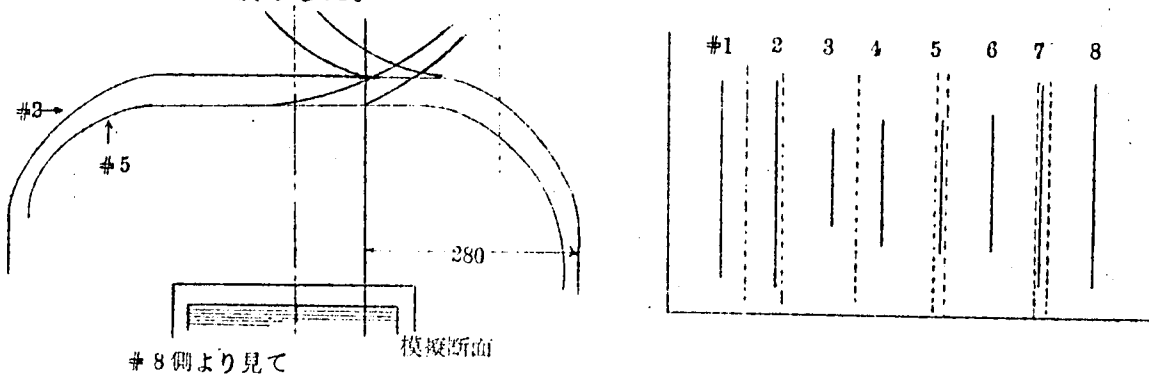
これらのコイル間磁束密度に電流値を掛けて電磁力の推定を行なうことはできない。なぜならばコイル間磁束はコイルと鎖交する磁束密度とは異なるためである。これらの事情は3.3.4項板電流の表現法のところでおこなった抵抗紙シミュレーターの結果、第3.3.-10図を見れば明かである。大ザツパにいて注目するコイルの両側空間の磁束密度の平均が鎖交すると考えればよい。

2. タップの影響は明瞭にでている。タップは#5コイルにあるために、#4～#5間、#5～#6間が顕著に影響を受ける。最低タップではタップ近辺で#4～#5間は盛り上がり、#5～#6間は凹んでいる。
3. 右辺と左辺とのちがいは主として低圧コイルの巻き始め、巻き終りのつなぎに生じるATの不均衡のために生じるものであるが、磁束密度分布にも表れている。左辺では#2コイルが#1と頭をそろえ、#7が#6よりも飛び出しているので、#2～#3間、#6～#7間磁束密度の山の形の相対位置がずれている。
4. ななめの位置におけるコイル配置は一見左辺とおなじように見えるが、実際はことなっている。コイルのATに関しては、左辺と同一であることは第3.5-2図コイルつなぎ図より明かであるが、コイルの彎曲部は必ずしも向心的に曲っていない。(高圧と低圧とでは鉄心に対する絶縁厚さがことなる)。このために磁束密度分布も左辺とはことなる部分がある。
5. 垂直方向電磁力の原因となる磁束密度分布を検討すると、#1～#2間および#7～#8間と、ほかの測定箇所とは大きなちがいがある。前者は平坦な形であるに比し、後者は大きな傾斜をもつ。この原因は巨視的に見て、高圧側巻線の平均磁気中心と低圧巻線の磁気中心は一致しておらず、高圧が10mm程度鉄心にちかい設計にしたために、低圧巻線はとびだし高圧巻線は沈もうとする電磁力を誘起するような垂直方向磁束が存在し、さらに低圧巻線は高圧巻線群より長く、タップ側壁および鉄心に近いために、その影響が顕著に表われたためと考えられる。
6. 垂直成分に対するタップの影響も主方向同様明瞭にあらわれており、#4～#5間および#5～#6間の磁束密度の高さの差としてみとめられる。
7. 垂直方向磁束密度の最大は、定格電流が流れているときでmax 250 Gauss程度である。ただし、この磁束密度が直接垂直方向電磁力の大きさを表すものでないことは、主方向と同

様である。(第3.3.-10図参照)

### 3.5.2 模擬精度の総合検討

抵抗紙による模擬法の総合精度を検討する目的で、コイル間漏洩磁束を、おなじコイル配置おなじ測定場所に注意して測定と模擬をおこなった。変圧器は詳細に検討すると図面寸法と出来上りでは多少の差(設計, 工作裕度)があるので、組上った実物トランスをできるだけ正確にスケッチして模写した。



第3.5.-6図 模写及び実測場所説明図

測定場所は上図のように右辺に相当するところである。実測と模擬の結果を比較しやすいように同じグラフに記載したものが第3.5-7図, 第3.5-8図である。

#### 1. 主方向電磁力相当磁束

傾向は良く一致している。たゞ鉄心とは反対側において、模擬の方が大部大きくなっているものがある(#2~#3間, #6~#7間)。この理由を検討してみるに、さきにもふれたように、模擬装置はできあがり変圧器のコイル位置を忠実に模擬するように注意しすぎたために、一つの誤りを犯していた。上図に示すように、模擬断面は運悪く#2および#5コイルの巻き始めに一致し(こゝ以外には右辺ではホール素子を挿入できる場所がない)、一見あたかもコイル巾が大きくなったような模擬をしてしまった。そのために実物では、1 TURN目と2 TURN目の間はすでに口を開けておりAT密度は減少しているのにもかかわらず、模擬ではコイル巾がいちように広がったように表現されているためと、誤差論のところでものべたように巻き始めの状態はすぐ終って左(or右)には巻線がなくなるにもかかわらず、模擬では無限につづくものと解釈するための誤差がかさなりあって、大きな差を生じたものと思われる。人手の都合で再試験をおこなっていないが、コイル巻き始めの影の薄いところを模擬すれば非常にいい一致をえることができるものと推定される。

コイル巾中央付近は模擬のほうかわづかに高目にでている(1.0%程度)が、これは有限長のコイル長さを無限として二次元で模擬しているためである。

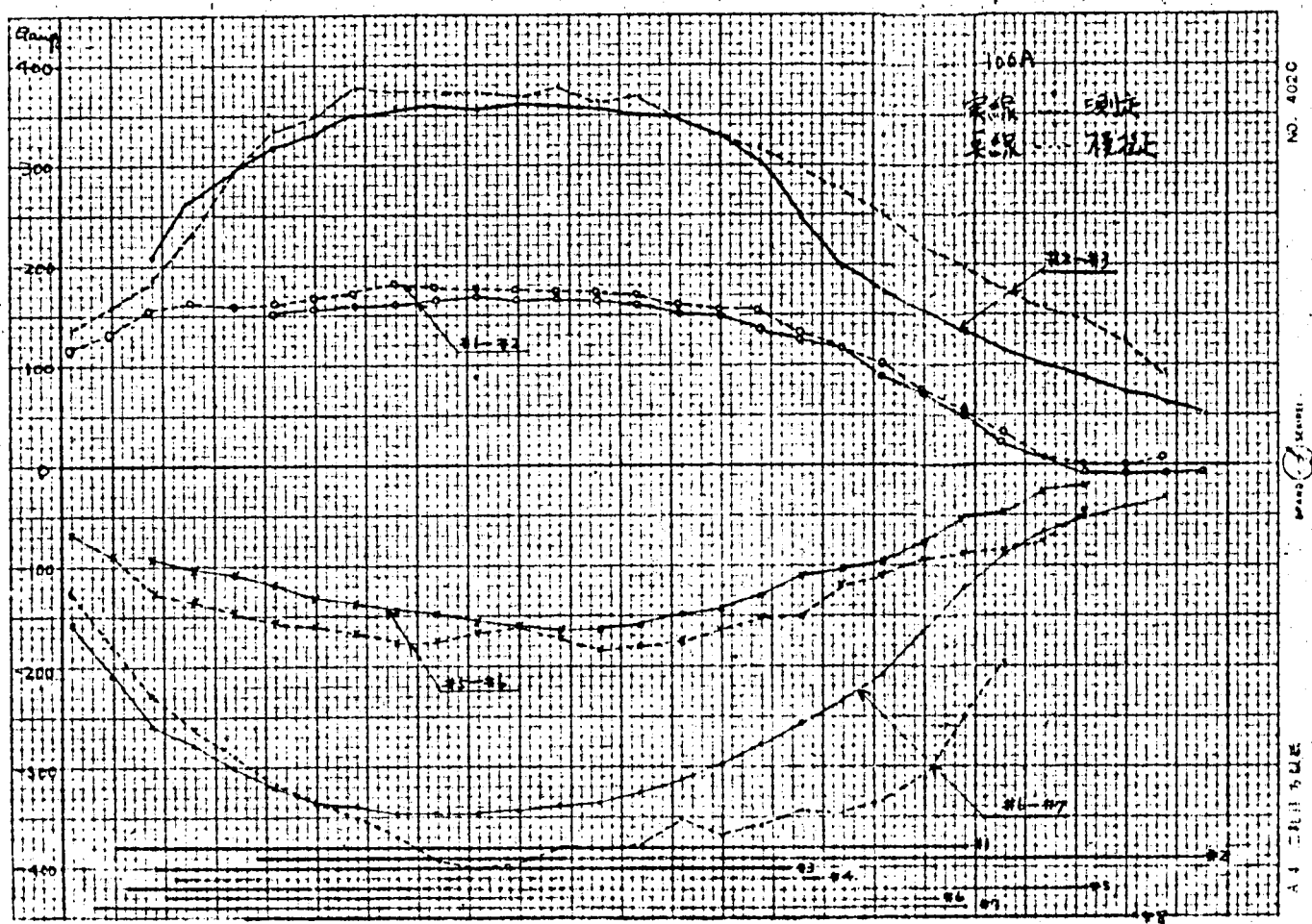


图 3.5-7 实测与模拟比较 (主方向磁力相当磁束)

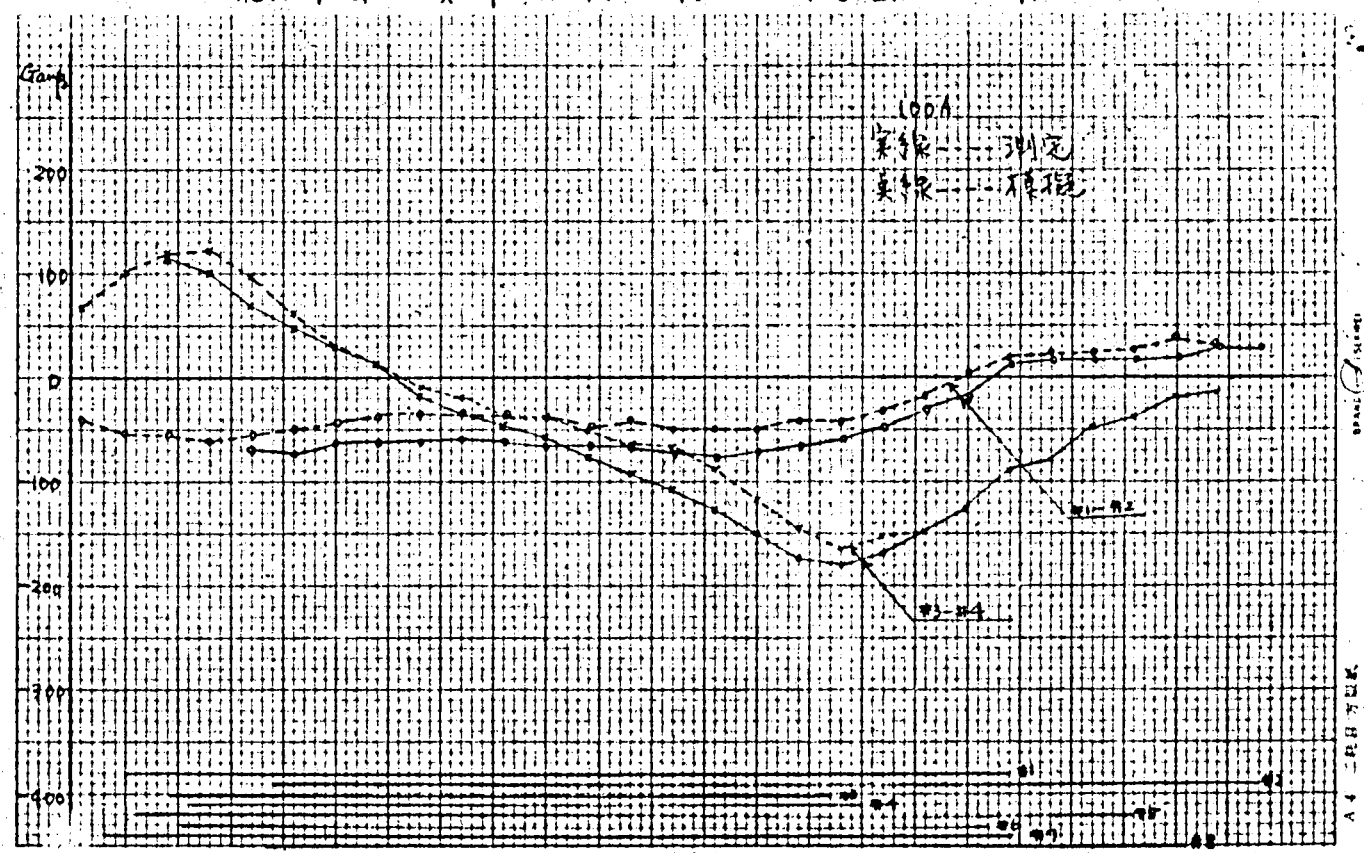
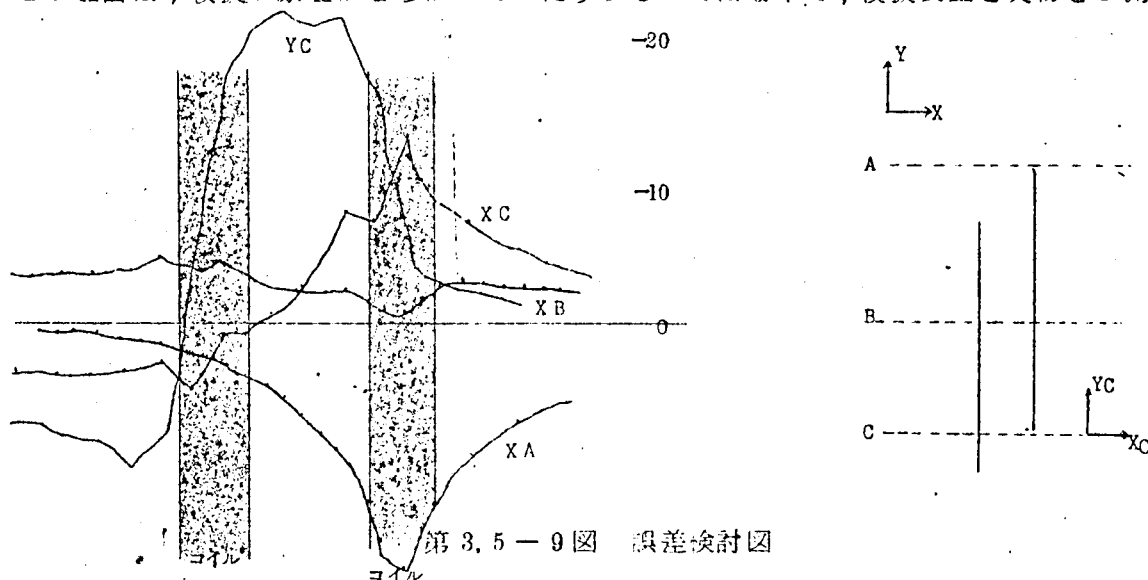


图 3.5-8 实测与模拟比较 (主方向磁力相当磁束)

## 2. 垂直方向電磁力相当磁束

この方向の精度はあまりよくない。傾向はよく一致しているが、大きさに相当な開きがある。この理由は、模擬の原理がまちがっていたりするのではなくて、模擬装置と実物との測定位置



第 3.5-9 図 誤差検討図

(コイルとの間隔) がわずかにちがうことが大きく影響してきているものと考えられる。上図は抵抗紙模擬装置による検討結果であるが、主方向磁束 YC は、コイルのギャップ内で左右どちらに動いてもほとんどかわらないが、垂直方向磁束 XC は、わずかに左右位置がずれると値は大巾に変化する。ホール素子による実測は、探針の厚さ、油隙に入れたときのガタなどを考えあわせると、模擬とまったくおなじ位置で測定したとはいいがたく、実測と模擬との不一致は位置設定の誤差によるもので、模擬法そのものの誤差ではないといえる。

## 3. 結 言

以上のことを総合して考えると抵抗紙模擬による漏洩磁束ひいては電磁力の模擬は非常に有効かつ高精度な方法であると断言できる。ただ

- (1) 二次元でもって三次元を模擬するための誤差
- (2) 導体の表現法による誤差
- (3) 導体を有限の大きさの点であらわすための誤差
- (4) 抵抗紙の性質による誤差
- (5) 測定時の個人誤差

などが存在し大ザツバにいて 10% 程度の誤差は入りうるものと考えたほうがよい。

### 3.6. 抵抗紙模擬による電磁力の推定

抵抗紙模擬によって漏洩磁束を求め実測と比較した結果、じゅうぶんの精度で推定と実測

が一致していることが実証されたので、いよいよほんらいの目的であるコイルに働く電磁力の推定をおこなうこととする。模擬状況の一例はさきにかかげたオ 3.2-2 図である。模擬はつぎの 8 ケースについておこなった。

1.	コイルエンド上部	最高タツブ	左辺
2.	〃	〃	右辺
3.	〃	最低タツブ	左辺
4.	〃	〃	右辺
5.	鉄心内	最高タツブ	
6.	〃	最低タツブ	
7.	コイルエンド底部	最高タツブ	
8.	〃	最低タツブ	

コイルエンド上部は、短絡試験をおこなうとき垂直方向電磁力を測定しているので、模擬による推定精度の検証のために測定した。左辺、右辺の別は、コイルの巻始め巻終りに必然的に生じる AT の不平衡の影響をみるために、垂直電磁力測定用の吊上バンド位置におけるコイル配置を、それぞれ模擬したものである。コイルエンド部の模擬の場合には、タンクは磁性体であつて、かつ漏洩磁束では飽和しないという仮定のもとに、抵抗紙を切りぬいて  $\mu = \infty$  として表現した。しかしこの点は、測定後のデータによると、飽和しないと仮定するのは多少無理があるようである。抵抗紙による模擬は二次元による模擬であるから、右辺左辺にわけたばあい、模擬場における深さ 方向の長さは、実物はきわめて短いにもかかわらず、模擬では無限につづくものとして解くために近似度はあるていど悪くなるが、2 枚のコイル間の漏洩磁束の検討結果より判明したように、あるていどのコイル長さがあれば無限長で推定できるので、左右のこととなるところは、別々に測定した。

鉄心内は図面どおりにおこなった。

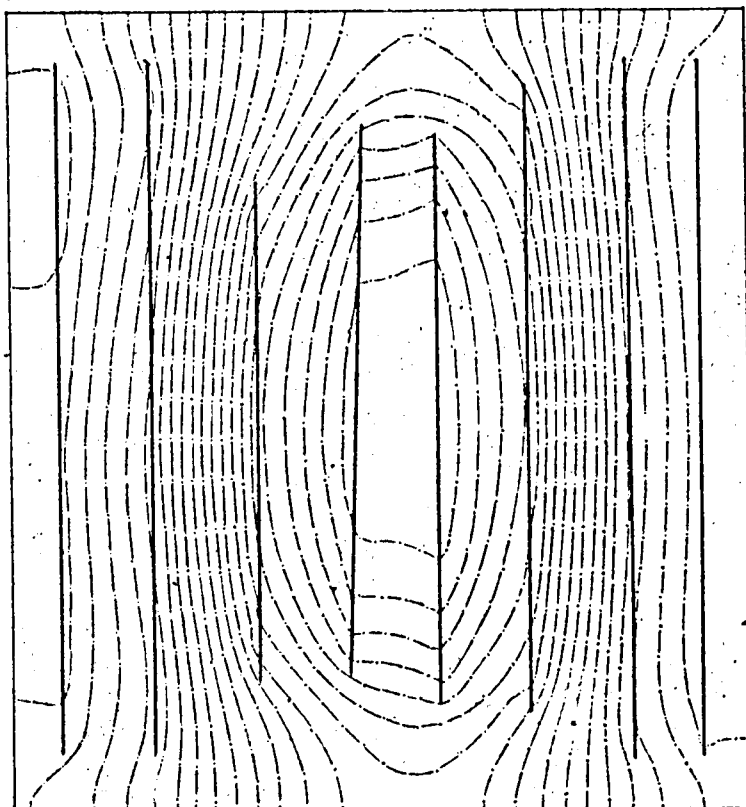
コイルエンド底部ではコイルは転位をおこなつていたので、コイル巾は広くなり、一枚のコイル内での AT 密度はいちようでないのであるが、模擬ではコイル巾は実物と同じとし AT 密度はいちように分布しているものとして模擬した。

模擬にあたっては

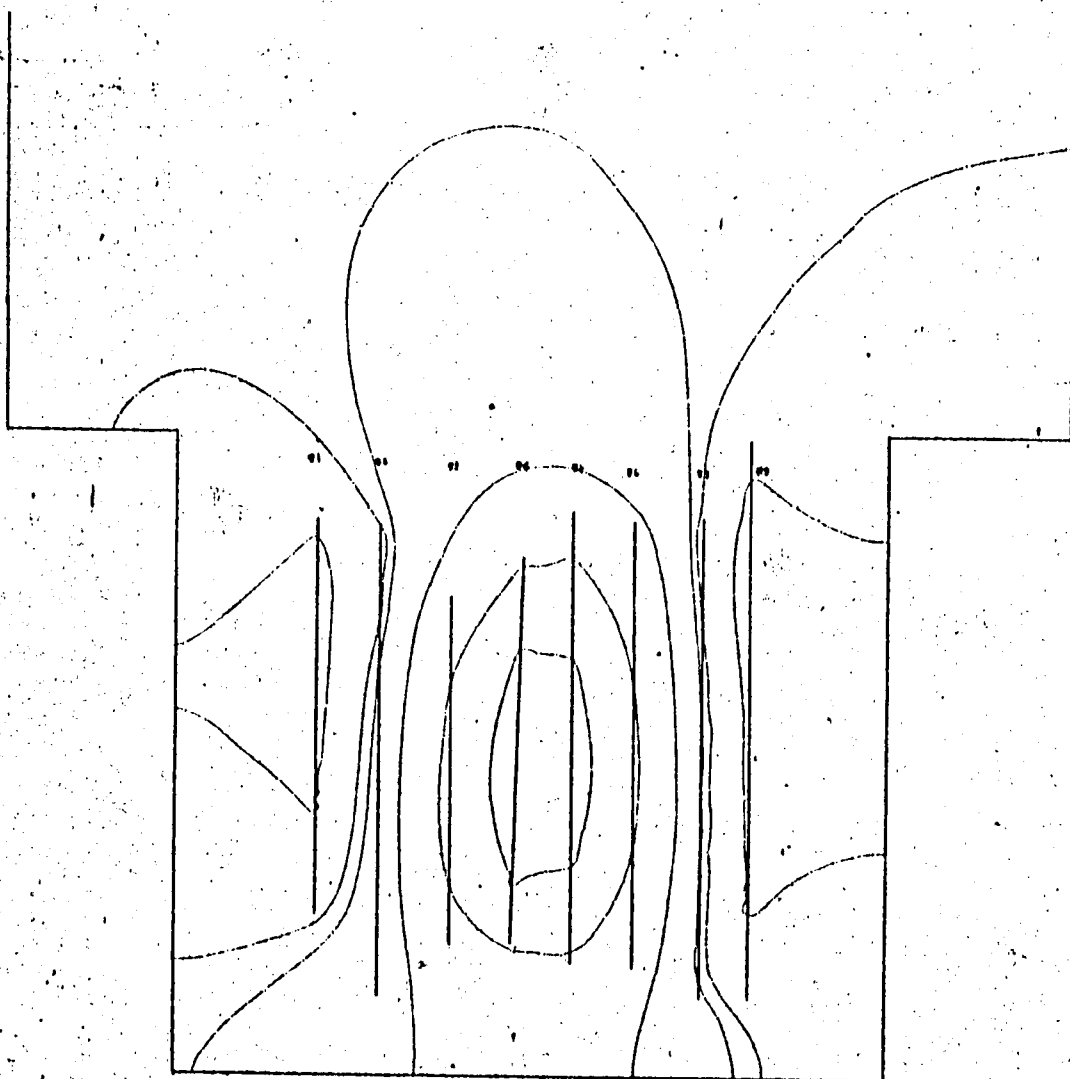
低圧コイルは 1 ターンをピン 4 本

高圧コイルは 1 ターンをピン 1 本

で表現した。

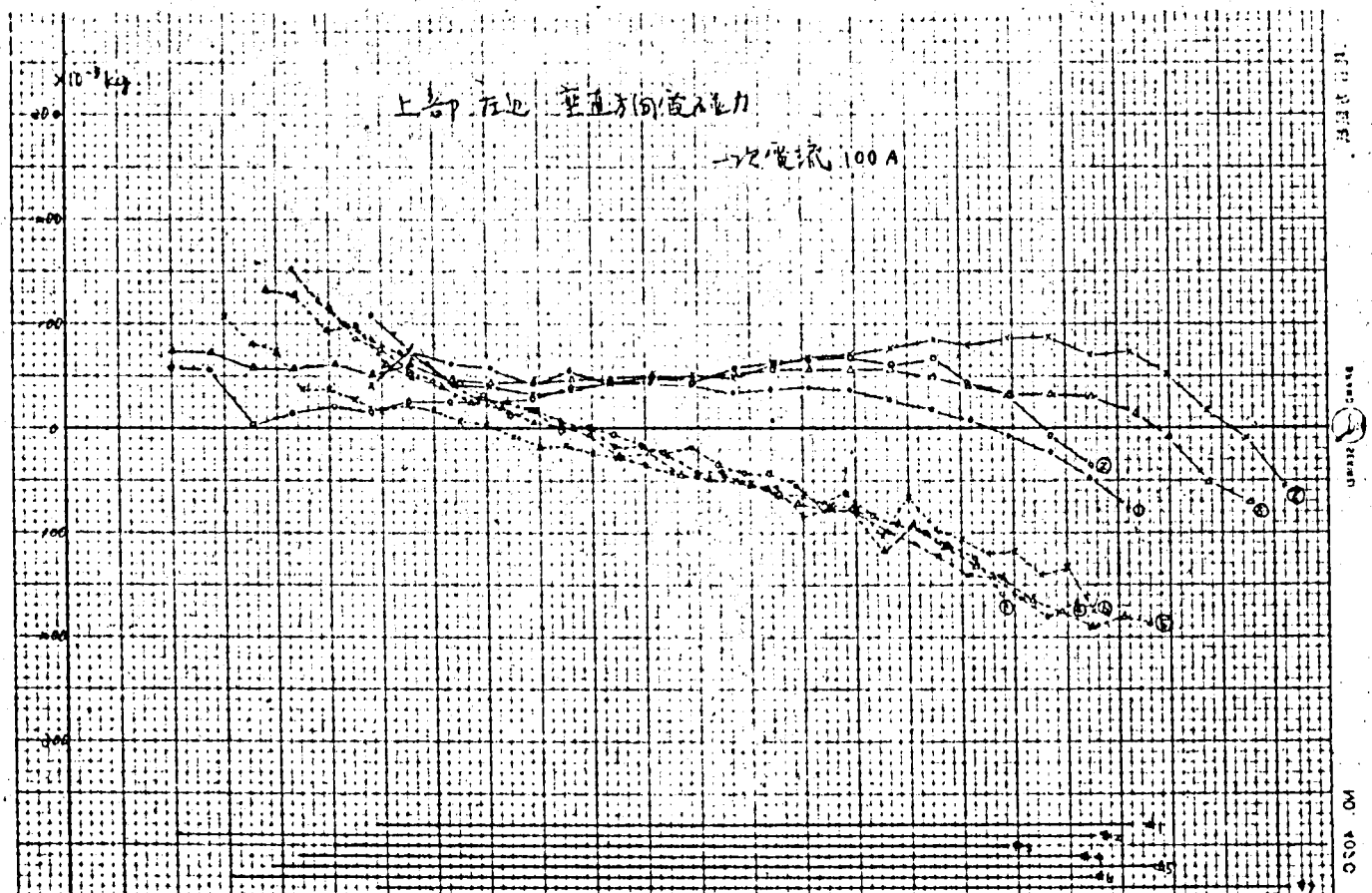
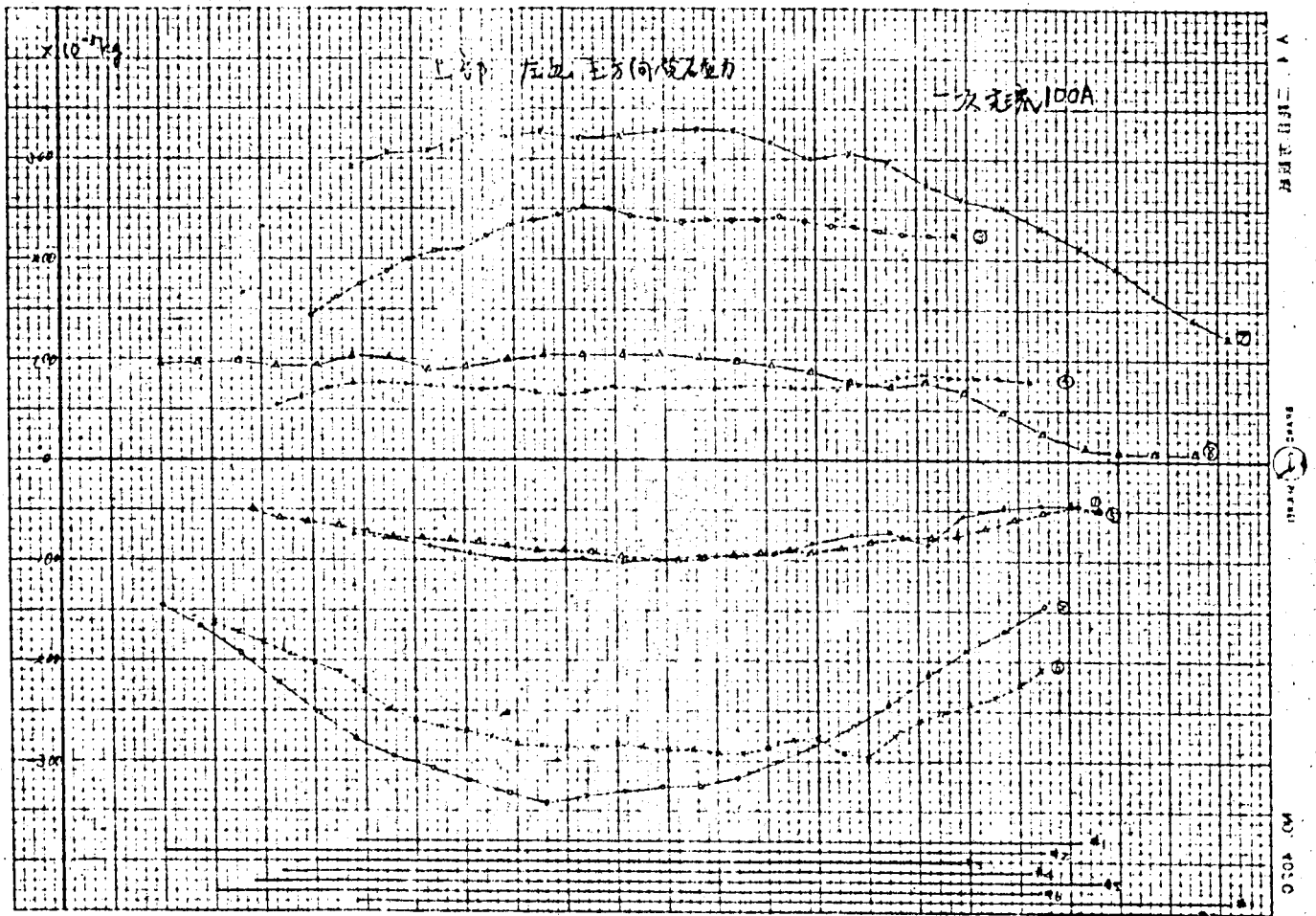


鉄心内

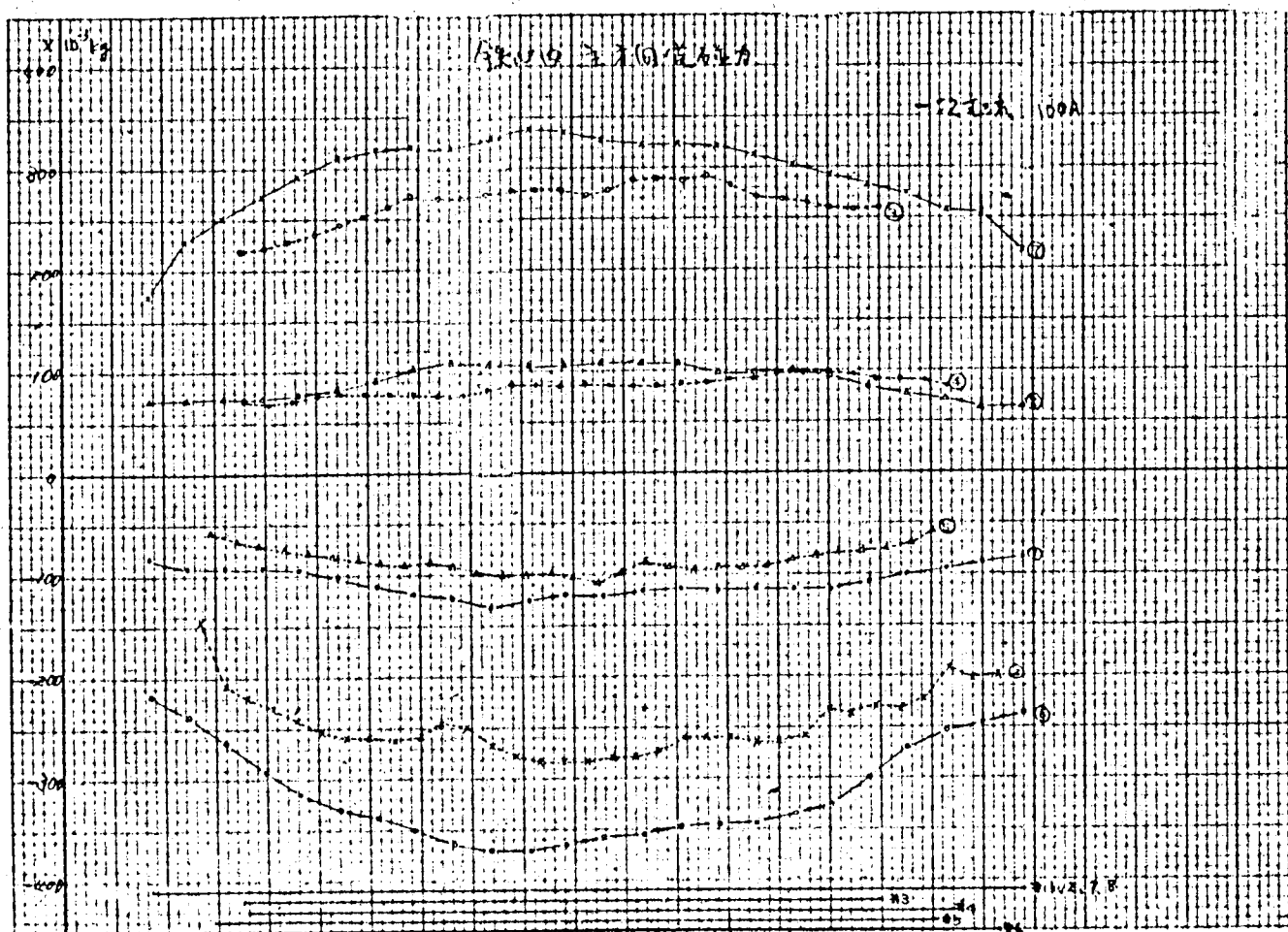


コイル工本 上部 地

3.6-1図 磁束分布



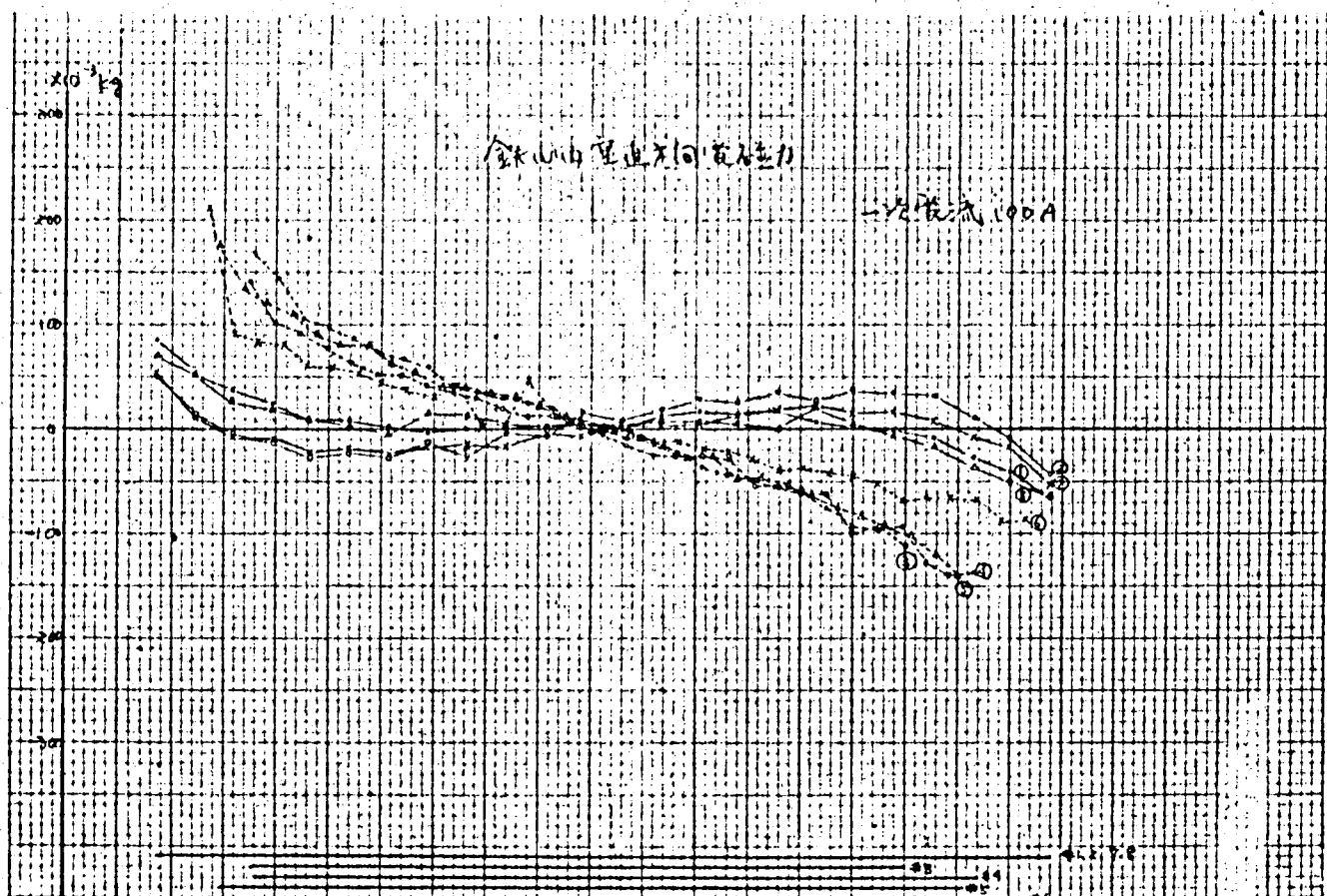
第3.6-2図 コイル素線に付く破断力 (コイル外)



NO. 4020

BRAND 5000

A 4 二軸力図紙



NO. 4

BRAND 5000

A 4 二軸力図紙

第3.6-3図. コイル素線に依る磁束力 (鉄心内)



第 3.6 - 1 図は鉄心内およびコイルエンドにおける等ベクトルポテンシャル線であつて、これは磁束の経路に一致している。

第 3.6 - 2 図 , , 才 3.6 - 3 図は測定結果の一例であつて、高圧巻線に 100 A 流した場合高圧巻線は 1 ターン、低圧巻線は  $\frac{1}{4}$  ターンの 1 M 当りに働く電磁力を Kg の単位で示している。任意の電流値における値を知りたいときは、100 A の倍数を 2 乗したものをこの値に乗ずれば求めることができる。電磁力の符号は、垂直方向は図面上で上向、主方向は右向きが正である。次表は、直流分がまったく含まれない状態で短絡された場合の電流 (FULL 5226.2 A MIN 5762.2 A) が流れたときの電磁力である。

第 3.6 - 1 表 電磁力模擬結果

条 件 COIL No		1	2	3	4	5	6	7	8
主 方 向 Kg/M	コイルエンド上FULL左	-4.38	-17.15	16.5	6.10	-6.58	-23.4	17.75	5.66
	コイルエンド上FULL右	-6.14	-18.0	17.05	7.10	-5.4	-22.45	17.45	4.84
	鉄心内 FULL	-7.42	-21.35	19.75	7.13	-7.34	-23.35	19.33	5.94
	コイルエンド下FULL	-4.54	-16.3	15.77	5.73	-5.91	-21.97	16.81	5.65
垂 直 方 向 Kg/M	コイルエンド上FULL左	1.61	2.34	-1.55	-2.45	-3.65	-3.33	3.38	3.26
	コイルエンド上FULL右	2.84	3.69	-1.87	-3.17	-3.06	-3.20	2.96	2.28
	鉄心内 FULL	0.43	0.62 -0.23	0.12	-0.20	0.56	0.34	0.09 -0.21	0.02
	コイルエンド下FULL	1.63	1.68	-1.32	-1.91	-2.41	-2.38	2.10	1.78

### 3.6.1 主方向電磁力

分布状態は、漏洩磁束の主方向成分ときわめて類似のものであつて、コイル巾中央付近をピークとし、両端が低くなる丘陵形である。各コイルに働く電磁力は、低圧コイル 4 枚は外側に、高圧 4 枚は内側にあつまる方向に働く。電磁力は、高圧、低圧の面するところのコイルに発生するものがもっとも大きく、その値は、鉄心内、コイルエンドなどの場所による差、タップ位置、左右によってことなるが、6TON ~ 10TON/M の大きさである。その他のコイルに働く電磁力は、上記の  $\frac{1}{3}$  ~  $\frac{1}{4}$  の大きさである。

鉄心内とコイルエンドの差はわずかながらでており、コイルエンドのほうが鉄心内よりも小さい。理由を考えるに、鉄心内のほうが鉄心にいたる距離が小さく、かつ四辺全部がとりかこまれており、さらに鉄心内では垂直方向の磁気中心のズレが小さいためである。

タップの影響は、各タップ相当のイムピーダンスを使用して計算した電流が流れるとして電磁力を求めると、ほとんど同じような値となる。

短絡試験をおこなうときの主方向電磁力の測定は、鉄心にかかる力を測定するのであるが、静

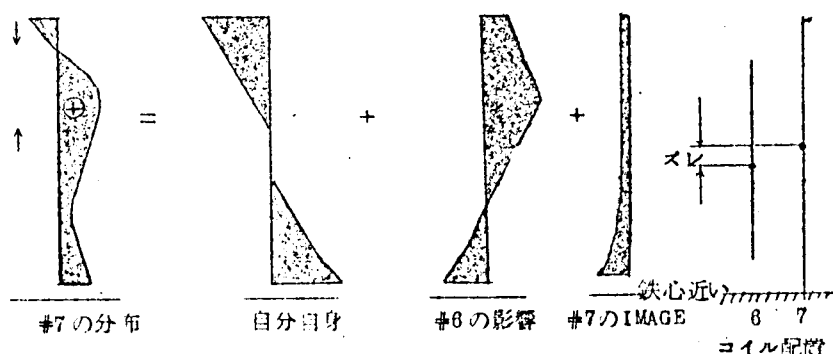
的に考える場合，# 1, # 2 コイルに働く電磁力の合計になるが，コイル長さとして何米に取るかは議論の余地のあるところである。鉄心の横高は 650 であるから，模擬によって得た  $Kg/M$  に 0.65 だけ掛ければよいものであるのか（タンク全体の受ける力は左右二脚の 2 倍する必要がある），それともコイルエンド部に働く力の一部を受持つとするものであるか，厳密な理論値は求むべくもないので，こんどはいちおう鉄心内のみのコイル長さを掛けることにする。

### 3.6.2 垂直方向電磁力

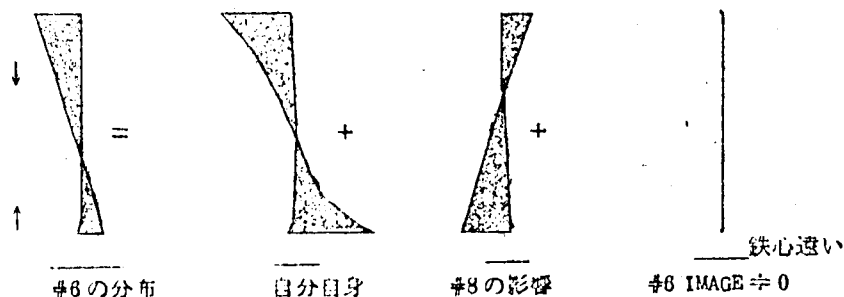
この電磁力は，垂直方向の磁気中心のズレ，およびコイル巾の長短によって発生するものであるが，そのほかに周囲の鉄心の影響も受ける。コイルエンド部においては第 3.6-2 図にも示したように，低圧コイル 4 枚はとび出し方向に，高圧コイルは鉄心方向に沈むように働く。これは高圧コイルの平均的磁気中心が低圧よりも低く設計されているためである。コイル内の電磁力の分布は高圧コイルと低圧コイルとではことなっている。模式的に考察してみると次図のようになる。

コイルに働く電磁力は，自分自身と，自分の隣のコイルおよび鉄心の影響を受けるわけであるが低圧コイルは鉄心に近いために，とくに鉄心すなわち自分の IMAGE の影響を受けやすい。コイルエンドでは鉄心は一方にしかないので鉄心の影響はかたよる。さらにまたコイルエンドでは，磁気中心のズレが大きく，コイル巾も高圧，低圧ではことなるために，右図のように高圧と低圧の分布はまったくことな

なったものとなる。タップによる差は，顕著にあらわれる。最低タップでは磁気センターのズレが大きくな



A) 低圧コイルに働く垂直電磁力



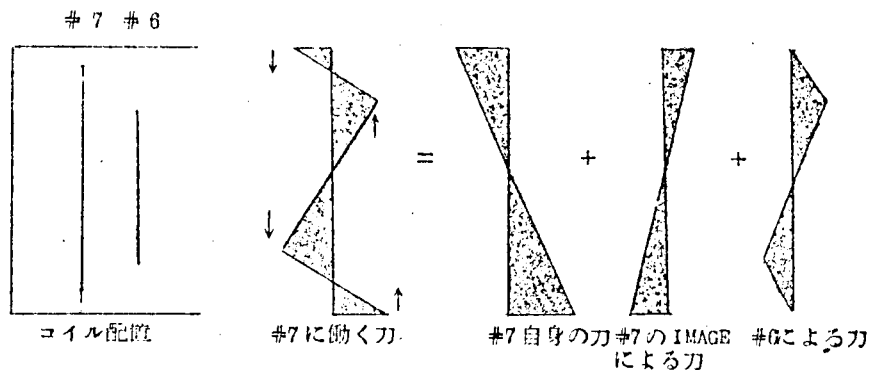
B) 高圧コイルに働く垂直電磁力

第 3.6-4 図 垂直電磁力の分布説明図

るので当然垂直電磁力は大きくなる。コイルエンド部は直線区間が非常に短く、また模擬で求めた  $Kq/M$  の電磁力よりコイル一辺に働く電磁力を求めることは、コイルそのものの機械的性質を究明しなければ断定できない。この点にかんしては章をあらためてろんじることとする。電磁力の大きさはもつとも大きいもので  $2\text{TON}/\text{M}$  程度である。

鉄心内においてはコイルエンドと多少おもむきをことにする。鉄心内は磁気中心のズレはほとんどないので、コイルエン

ドのように低圧はとび出し  
高圧は沈むというようなき  
まつた方向性はもたない。  
また当然のことながら、垂  
直電磁力はきわめて小さく



最高タップではほとんど電磁力

第 3.6-5 図 コイル中割れ説明図

は働かない。ただこのばあい、低圧コイルにおいては、コイルは巾中央で2つに別かれる方向の力が働く。これは隣のコイルが短くさらに、鉄心が近いためによるもので、上図のように分解できる。コイルエンド部のように磁気中心のズレが大きい場合とか、鉄心が上下のうちどちらか一方にしかなく、IMAGEの影響が一方にかたまる場合にはこのような現象は生じない。したがって MIN TAP (鉄心内) では生じていない。

垂直方向電磁力の測定は主方向に比して値が一般に小さいので精度が悪い。さらに1枚のコイル全体に働く力を求めるときは第 3.6-4 図、5 図からも明かなように、ことなる方向の力の差となるのでますます悪くなる。そこで、1枚のコイル全体に働く力が必要な場合には、コイル両端の電位差を一度に測定したほうが精度がよい。ただ第 3.6-5 図のようにコイルの中割れするものは、中割れ点をさがしだして上下別々に測るべきである。

### 3.7 結 言

1. これまで使用してきた電気学会の式による電磁力の推定は、コイル枚数が多くしかも段絶縁をほどこしてある大容量外鉄形変圧器にたいしては精度が悪く、かつ分布がわからないので、抵抗紙模擬による電磁力の推定の方法を確立した。この方法はベクトルポテンシャルが電圧になって表現され、漏洩磁束、電磁力、リアクタンスなどの分布が求まる。
2. 抵抗紙模擬をおこなう場合いろいろの誤差はいるが
  - 1) 抵抗紙は温度、湿度の影響を受け、また紙内の抵抗値にもバラツキがある。とくに湿度に

よる影響は大きいので、恒湿の部屋が望ましい。

2) 導体を表現するのに面積の代表として点をもちいるが、導体近傍ではこの表現法による誤差が入るが、点の数が多ければ普通問題とにならない。

3) 導体を表現する点の大きさは、できるかぎり小さいほうがよい。導体に鎖交する磁束を求めるときはこの誤差に留意しなければならない。

4) 巾のある電流板を表現するのに、1列のピン列で表現した場合と、多列で表現した場合を比較すると、導体外ではほとんど差はないが導体内では多少差が生ずる。

3. 三次元像を二次元で解析する場合、あるていどの長さがあれば、それが無限につづくと解釈して二次元で解いても相当精度よく推定できる。

4. 模擬の総合精度を検証するために、モデルトランスのコイル間漏洩磁束を実測と模擬で比較したが、非常によい一致をみた。

5. 変圧器コイルに働く電磁力の推定をおこなったが、3の結論にもとづき、コイルエンド部はATの不均衡があるので左右べつべつに模擬した。主方向電磁力は定格短絡電流に相当する電流（peak値）が流れた場合に、10TON/M程度の大きさである。垂直方向電磁力は鉄心外の方がはるかに大きい、これは磁気中心のズレのためである。鉄心内ではコイルの中割れを生ずる。

6. 電磁力の推定をおこなう場合には、導体をあらわすピンに鎖交する磁束を測定するのであるが、このとき着目する点えの電流供給を止めて測定する方法も有るが、ピンの数が無限である場合には磁界を乱さないが、実際は有限であるのでAT分布を変えることになり誤差の原因となる。垂直方向のようにATのわづかのズレが大きな影響をあたえるものにたいしては好ましい測定法ではない。この誤差を逃げる方法としては、コイル板の両側の電位差を電流供給点中間で求める方法を開発したが精度ははるかに良好であつた。

## 文献

## 1) 変圧器専門委員会

短絡時における変圧器巻線の機械的強度について

電学誌 70巻 743号

## 2) BEAVERS and ADAMS

The Calculation and Measurement of Axial Electro-Magnetic Forces  
on Concentric Coils in Transformers

P.A.S, August. 1959. P467

## 3) L.TORSEKE

Short-Circuit problems in Large Transformers

CIGRE No.142 1962.

## 4) 竹山説三

電磁気学現象理論

## 5) 大谷・桑原

内鉄形変圧器の洩れ磁束と電磁力の推定

38年 連合大会 739

## 6) 大谷・渡辺

外鉄形変圧器の電磁力の推定

39年 連合大会 609

## 7) R Forgestad.

Electro-Magnetic Forces in Core-Type Transformers with Concentric  
Windings.

CIGRE No.114 1956

## 8) W. Knaack

The Mechanical Stressing of Transformer Windings Upon Short-  
Circuit

CIGRE No.135 1956

## 9) J.Kulda,

Problems of large Transformer

ii Short-Circuit Forces in Large Transformers.

CIGRE No.136 1958

## 10) A.Richon, B.Hochart, F. Salgues,

Problems Concerning the Behaviour of Transformers on Short-  
Circuit

CIGRE No.142 1958

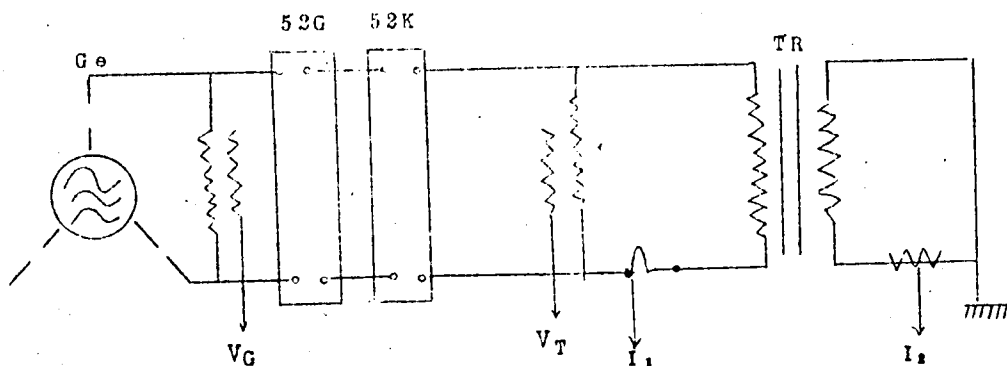
## 第4章 交流短絡試験

才う章において、抵抗紙模擬装置による電磁力の推定の結果をえたわけであるが、これらの推定値が実際とどのていどの一致をみ、また実用に供せられるものであるかを調べるとともに、変圧器が短絡時にどのような様相を呈するものであるかを求むべく、いろいろの機械量、電気量を電磁オシロに記録すると同時に高速度カメラに撮影し、変圧器の短絡強度を決定する因子は何であるか、またそれらの値をどのていどの押えるべきであるかの情報をえるために、短絡試験を実施した。才う章においては、整流器逆弧時の短絡試験を実施するので、とくに交流短絡試験と名付けた。本章においては試験回路、条件をまづ述べ、つぎに電磁オシロ、高速度カメラの整理をおこなった結果をかゝげ、推定との一致性、短絡時のコイルの運動、応力などの現象に検討をくわえたあと、故障検出の非破壊的な方法について論じた。変圧器を解体点検したところ、短絡に対する弱点も発見でき、その対策をいかにすべきかと判明した。以下順次くわしく説明をおこなうこととする。

### 4.1 試験回路および測定

#### 4.1.1. 試験回路

短絡試験は当所の大電力試験設備をもちいておこなわれた。本変圧器は、1000 KVA ベースで4%程度のイムピーダンスであるので、本設備は十分な短絡容量を持つわけで、破壊にいたることも可能であるが、破壊をおこなってから分解しても破壊前の状態が損なわれてしまい情報量が減ってしまうので、破壊までの試験はおこなわなかつた。試験回路を第4.1-1図に示す。



才4.1-1図 試験回路

同図において

Ge : 短絡発電機 (50 MVA, 13.2 KV)

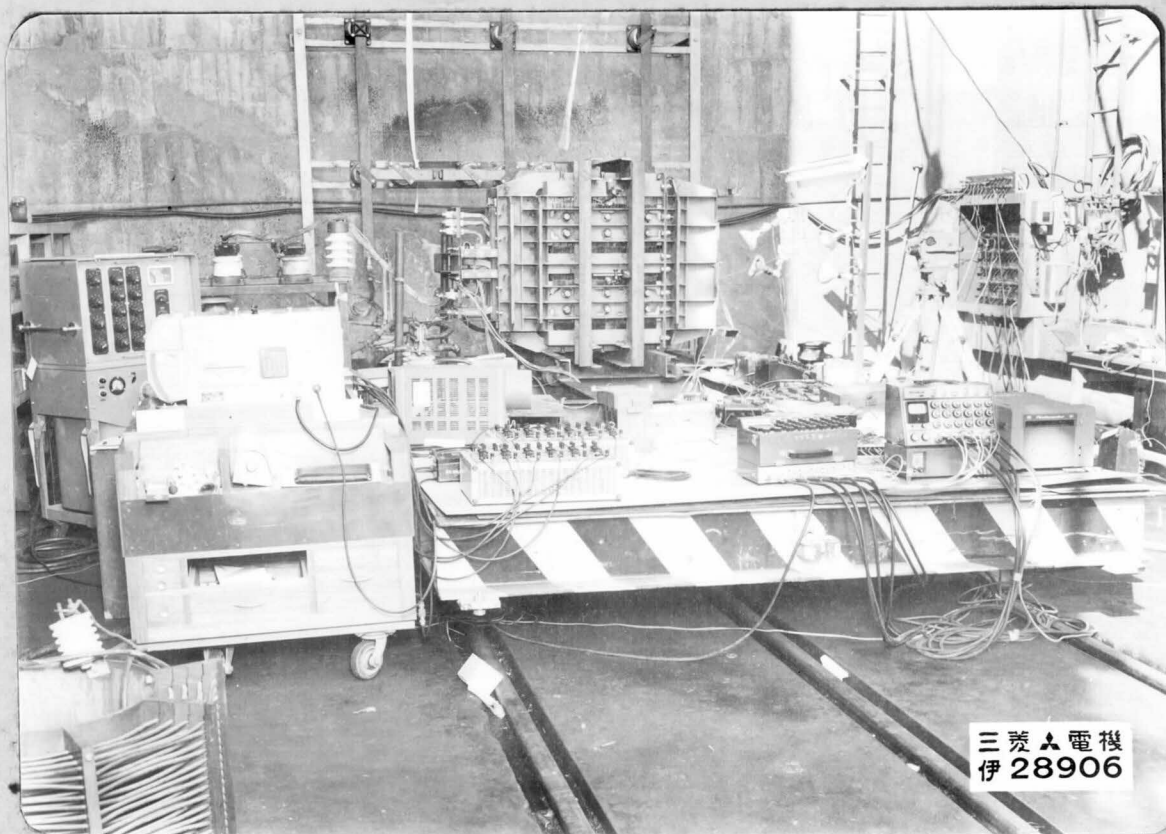
52G : 保護用遮断器

52K : 投入用遮断器

TR : 1000 KVA 被試験器

である。変圧器は二次側を最初から短絡しておき、一次 (6 KV) 側より電圧を印加した。電流通電期間は 60 サイクルペースで 7 サイクル程度をねらった。52K 投入用遮断器は投入位相の制御が可能である。交流回路の短絡時には、短絡位相によって電流に含まれる直流分の割合が変り、短絡試験設備のように回路力率がほとんど 0 の回路では、投入位相  $0^\circ$  もしくは  $180^\circ$  のときに直流が最大に含まれるので、試験はすべてこの位相をねらっておこなわれた。直流分をふくむように短絡すると電磁力には直流成分、60 サイクル成分、120 サイクル成分があらわれ、短絡強度を動的に検討する場合には、複雑ではあるがもっとも多くの情報を提供してくれる。実物変圧器が線路につながれていて短絡を生じた場合、もっとも大きな電磁力を受けるのも直流分最大の場合であるから、このチャンスに耐えるものでなければならない。

短絡時間を 7 サイクル程度にえらんだのは、この設備の直流分減衰時定数よりみてこれだけとれば完全に交流分のみになり、直流分 0 の場合の推定および定常状態の測定ができること、お



第 4.1 - 2 図 A.C 短絡試験全景

よびあまり短絡時を長くすると気中であるために温度上昇のおそれがあり、また万一内部短絡事故が発生した場合の被害を極力小さくすることを考えて決めた。

試験は変圧器を横倒しの状態でおこなった。これは高速度カメラによってコイルの動きを測定するためであって、第4.1-2図に試験状況を示す。

#### 4.1.2. 短絡試験時の測定項目

短絡試験時における測定でもっとも困難なことは、大電流、高電圧の急変により惹起される電磁誘導の問題であるが、この点に対する技術は遮断器の遮断容量試験の経験より解決済みである。ある文献によれば、誘導の問題を逃げるために電源周波数を1/10程度におとして測定した例もあるが、筆者はその必要を認めない。また動的に強度を検討するためには周波数を変えてはいけな。測定項目を大別すると、短絡試験中に測定する項目と、試験の前後に測定する項目に分けることができる。前者は短絡現象そのものの解明に必要な項目であり、後者は試験条件を決定し、故障の発生を予知する目的のためのものである。さらに情報の性質から電気量と機械量に分けられる。

##### (A) 電気量

第4.1-1図試験回路にも示されるように、試験回路条件を決定する因子である。

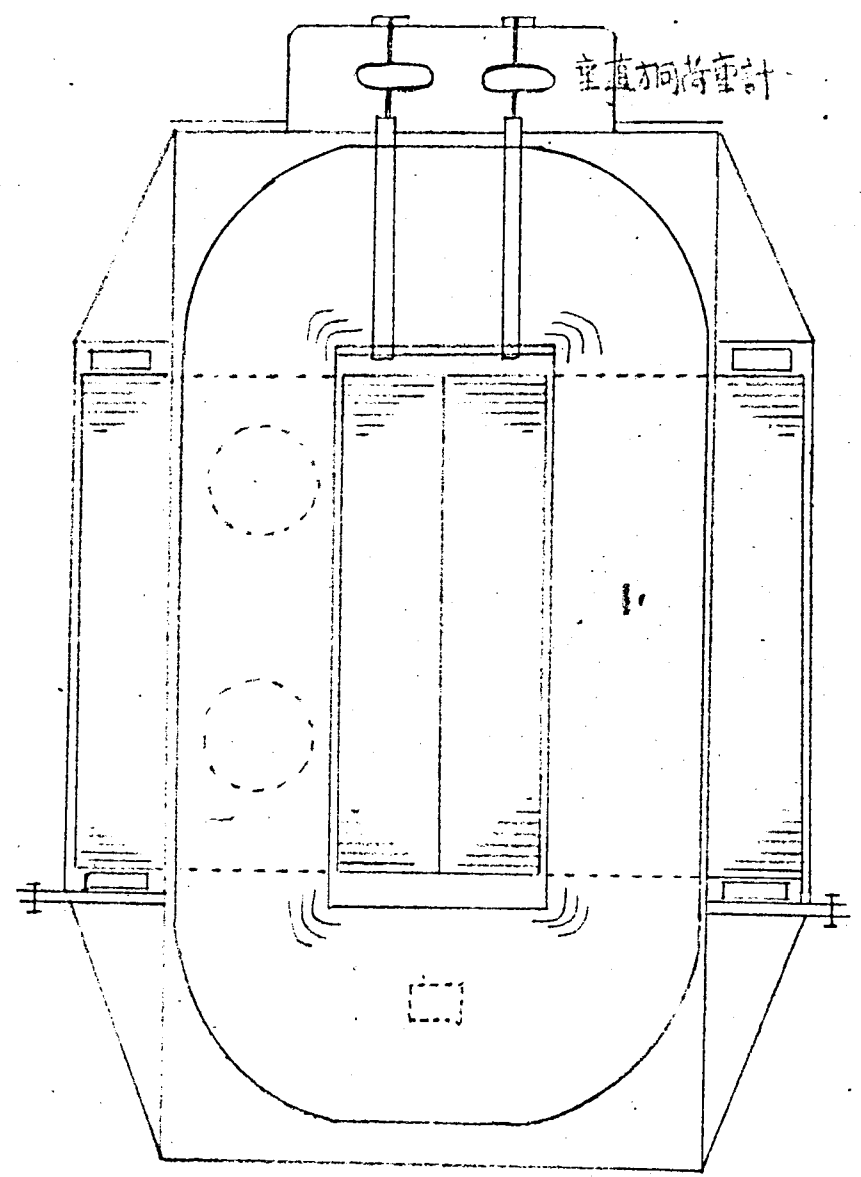
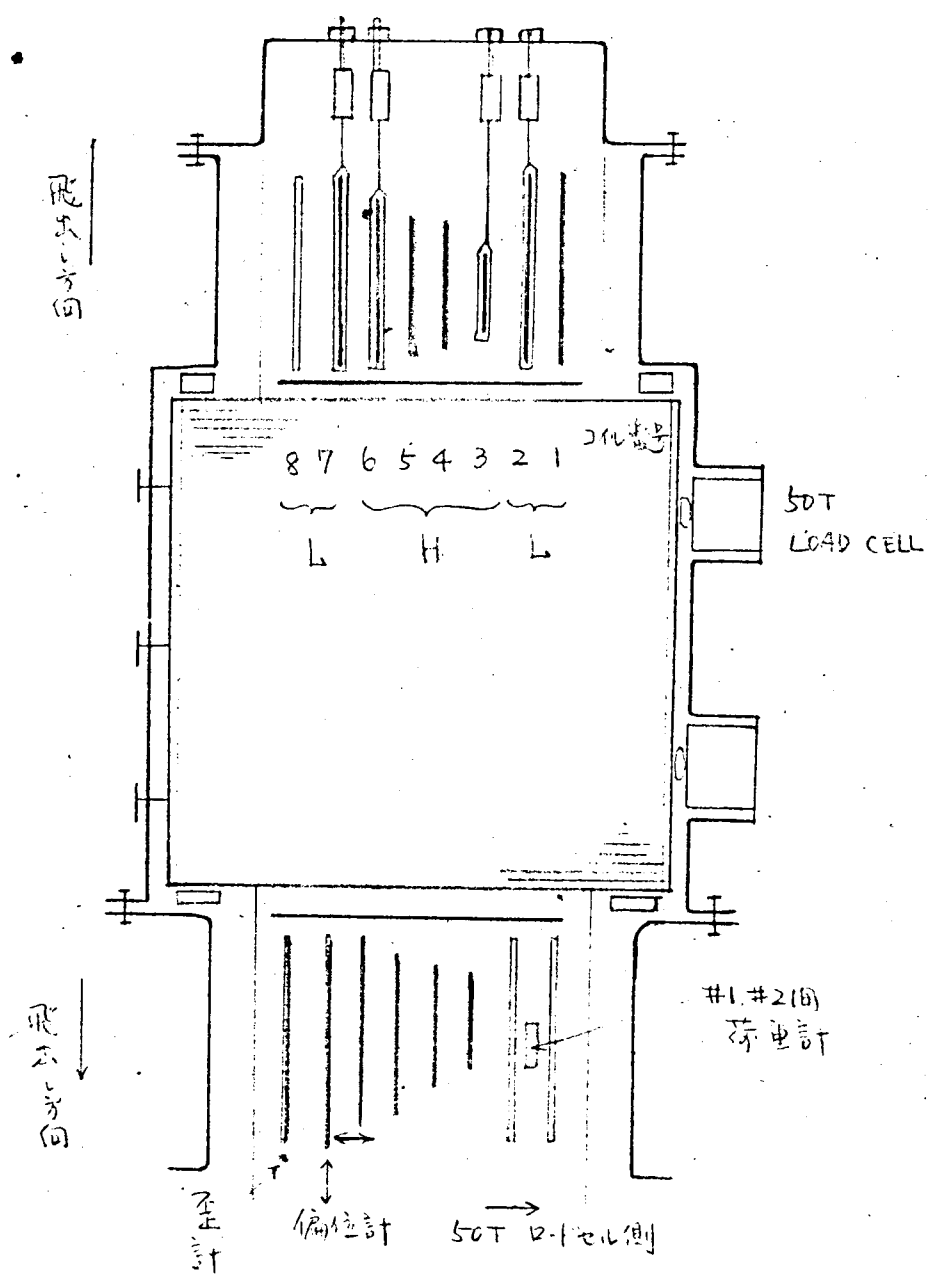
- (1) 一次電流 短絡時の電磁力の発生源であって、もっとも重要な測定項目である。測定には  $6.67\mu\Omega$  の無誘導シャントを使用した。一次電流には短絡電流のほか励磁電流も含まれる。
- (2) 二次電流  $10\text{KA}/5\text{A CT}$  を使用した。このCTは特別に設計されたもので、直流分の再現性がよい。
- (3) 一次電圧  $6.6\text{KV}/110\text{V PT}$  を使用。一次電流で割算するとインピーダンスがわかる。電磁力によってコイルは運動するために漏洩インダクタンスは変化するはずであり、このようすを知るために測定した。また投入位相もよくわかる。
- (4) 発電機電圧 試験回路の事故ならびにレギュレーションを読取るために測った。  
 $13.2\text{KV}/110\text{V PT}$  による。

##### (B) 機械量

変圧器の短絡強度に関する量であって、下記の項目を測定した。目的と測定器、測定方法について簡単に説明を加える。第4.1-3図参照。

- (1) 主方向電磁力 短絡時にコイルに働く電磁力を測定する。前述したように厳密にいうと、これはコイルに誘起された電磁力ではなくて、電流が流れて生じた電磁力によってコイルが運動し、鉄芯を介してタンクに働く力である。測定は50TON荷重計を使用した荷重計は、

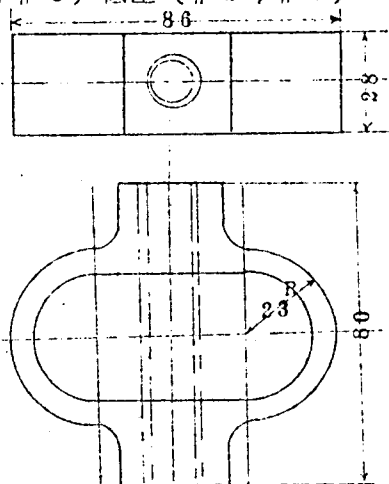




第4.1-3圖. 測定箇所及び測定項目

第4.1-3図に示されているように、タンクに設けられた筒の内に保持され、均圧板を介して圧着鉄心に触れている。荷重計は抵抗線歪計形であるが、この形の荷重計はここ数年急速に発達してきた技術で、搬送波の周波数は約5KCを使用し位相検波をおこなっているので、誘導を拾いにくく、電気系の周波数帯域は500 サイクルまであり、電磁オシロと組み合わせて測定するような場合に最適である。

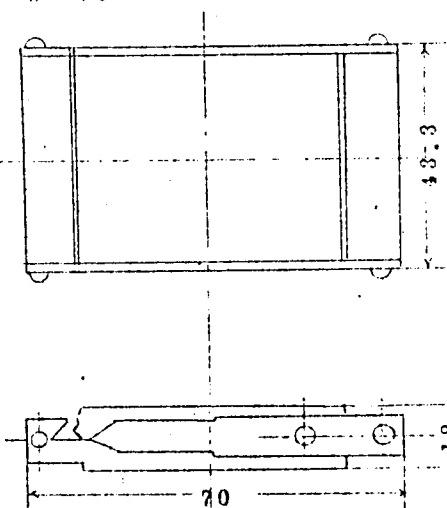
- (2) 垂直方向電磁力 コイルエンド部の、垂直方向電磁力に対する強度が外鉄形変圧器の弱点と考えられるので、とくに念入りに測定した。高圧(#3, #6) 低圧(#2, #7) の4コイルの左右におのおの吊バンドをかけ、第4.1-5図に示すようなループ形の荷重形を介してタンクに固定し、コイルエンドに力が加われば、この荷重計を圧縮もしくは引張り、力が測れるようにした。圧縮、引張り両方が交番して働いても正確に測れるように、連結部は接着剤でかため、ネジはダブルナットで締めてガタを生じないようにした。この荷重計も抵抗線歪計形である。



- (3) コイル間に働く力 主方向電磁力の総計は50TON

荷重計で測定しているが、コイル間のカルタに働く力を 第4.1-5図 垂直力用荷重計 測定しておけば主方向電磁力を詳細に検討するときに役立ち、またカルタに働く力もわかるので特別にうすい荷重計(厚さ1.2mm)を開発し、#1~#2間のカルタのかわりに挿入した。位置は下側コイルエンドの中心線上、コイル巾中央である。第4.1-6図は荷重計の構造図である。

- (4) コイルの偏位 短絡中のコイルの運動を検討するために測定した。偏位計は巾10mmの燐青銅板で片持梁を作り、裏表に4枚のゲージを貼って偏位計をつくった。取付の都合上長さは2通りとなり、



- 主方向測定用は 固有周波数188~, 減衰時定数 79ms  
コイル飛出方向用は 432~, 減衰時定数 30ms  
となった。測定したコイルは#7コイルの下部コイル

第4.1-6図 コイル間荷重計

エンドである。片持梁の先端をコイル素縁にうすいプレスボードの小片をかいして触れさせ、コイルがどちらに動いても遊びを生じないように初期張力を充分あたえておいた。絶縁上の問題と、取付けの点から、測定は#7の低圧コイルについておこなった。(高圧コイルはコイルがへこんでおり偏位計をとりつけることが困難である。)

さらにコイルの相対的な運動をとらえるために、高速度カメラを使用して、# 5, 6, 7, 8. のコイルの主方向の運動を3000 駒/sec の速さで測定した。高速度カメラはフィルムの編集の時短絡瞬時を発見することがなかなかむづかしいので、1 msec の刻時に短絡瞬時のマークを重ねさせる方法をもちいて非常に便利であったので付言しておく。

#### 4. 1. 3. 試験前後の測定項目

- (1) 締付け圧力・変圧器の短絡強度を決定するものの一つであると考えられるので、試験のまえに毎回、何TON の締付け状態にあるかを測定した。測定には50TON 荷重計を利用した。動歪計の零点移動で測ることもできるが、精度がでないので静歪計につなぎ換えておこなった。締付力は短絡を繰返すとゆるんでくるものであるが、このモデル変圧器は商用のものに比してタンク構造、とくに鉄芯の剛性がバットジョイントのために小さい。締付け圧力の減少がタンクのふくらみによって生じたものか、それともコイル群の絶縁物の残留歪によって生じたものであるかの区別ができるように、鉄心のゆるみもノギスを用いて測定した。
- (2) コイルの寸法検査 短絡によって生じるコイルの変歪、移動をタンクを基準として下部コイルエンドについて測定した。
- (3) コイルの残留歪 コイル素線に働く応力を、短絡中に測定することは絶縁の問題から不可能であるので、残留歪を# 8 コイルの最外周で測定した。コイルエンド部が飛出す方向に電磁力が働いた場合には、コイル1枚としては、膨む方向で、コイル素線には引張り応力がかゝり、大きければ銅の性質として残留歪を残すから、逆に残留歪を測って短絡時に生じた最大応力を推定せんとした。
- (4) 故障検出 実物変圧器では一度運転にはいれば、内部点検はおろか停電もなかなかおこなえるものでない。まんいち変圧器に異常が生じた場合には小さいうちにそれを見出し、事故を未然に防ぐべきである。そのために、非破壊的な異常発見の方法をいろいろ検討した。

1. イムピーダンス 電圧電流計法によった
2. キャパシタンス シェーリングブリッジを用い、HE, LE, HL 間静電容量を測定
3. 固有周波数 二次側短絡時のもので、発振器の周波数を連続的に変え、同調点をVTVM で見付け、そのときの周波数はカウンターで読んだ
4. 抵抗 巻線温度上昇と、極端なコイル変形の場合には、残留歪によって抵抗が変わるであろう。測定にはケルビンダブブルブリッジを使用した

#### 4. 1. 4. 測定器

使用した測定器の中、主なものは次の通り

1. 12要素電磁オシロ	三栄測器製	500B形
2. 直記式12要素電磁オシロ	横河電機製	EMO-1形
3. 6要素抵抗線動歪計	新興通信製	DS6-MTH形
4. 静歪計	新興通信製	PS-7L形
5. 高速度カメラ	日立精機製	16-HB形
6. 50TON荷重計	三菱電機製	
7. 4桁エレクトリックカウンター	タケダ理研製	TR-108D形
8. 発振器	松下電器製	RC-711A形
9. 微小交流電圧計	横河電機製	VM-11形

## 4.2. 試験結果

### 4.2.1. 試験条件の選定

短絡試験をおこなう目的は、緒論の研究目標のところでのべたように

○変圧器の強度を決定する要因を探り、強度増強の方策を立てる。

○電磁力推定の精度を検証する。

ことにあるが、しからは具体的などのような条件、手順でおこなうかは非常に重要であるが、またむづかしい問題でもある。とくに別途、先行しておこなったコイル群の機械的性質より明らかになったことであるが、コイル群は加えられた荷重にたいして履歴現象をもつために、やりなかりがきかない。家庭電器のように単調のわりあいに安いものであれば、試料の数を多数個作ることも可能であろうが、1000回の変圧器では不可能である。したがって試験まえに全試験ケースの計画を立て、試験をおこなうたびに、えられた結果を検討して計画を修正しながら、短絡をくりかえしておこなった。

ねらった目標を列記すればつぎのとおりである。

1. 短絡電流を逐次増加させていくと電磁力、応力、運動はどうなるか。  
電流の自乗に比例して増加するものであるか。
2. おなじ条件でくりかえし試験をおこなえば同じ現象があらわれるか。
3. くりかえし同一短絡電流で短絡をくりかえすと、締付力はどう変るか。  
さらに電流を増せばどうなるか。
4. タップ位置によつて電磁力は変るか。推定との比較ではどうなるか。
5. 締付力を変えた場合どのような差異があらわれるか。
6. 測定法の検討、など。

これらの条件をすべて満足する試験計画を 1 台の供試変圧器でおこなうことは不可能であるが交互作用を閑却して，結局 50% 供給電圧から始め，タップを変え，くりかえしの効果をみながら，100% まで電圧を上昇させた。

表 4.2-1 試験ケース

試験電流	タップ位置	回数	注
50%	大	1	オシロの感度合せ
50%	大	2	50% におけるタップ位置による差をみる
50%	中	2	
50%	小	2	
50%	小	2	締付力を増加。低いときとの差をみる
50%	大	2	
70%	大	2	
70%	小	2	70% におけるタップ位置による差
85%	大	2	
85%	小	2	
100%	大	2	100% における締付力の差
70%	大	8	
100%	大	2	
100%	小	1	繰返しによるゆるみ及び測定法チェック
100%	大	2	100% の再確認

#### 4.2.2. 初期締付力

変圧器の締付圧力はコシ 1505 で規定されている。

W：最大ワッシャーの巾 [mm]

L：長 [mm]

P：締付全圧力 [t]

としたとき

$$P_{max} = 4WL \times 10^{-5} \quad [t] \quad \dots \dots (4.2-1)$$

$$P_{min} = 8WL \times 10^{-6} \quad [t]$$

現在の締付圧力にたいする考えかたは，コイル群を鉄芯窓枠寸法にはいるように締めた場合に締付荷重が上記  $P_{max}$  と  $P_{min}$  の間に

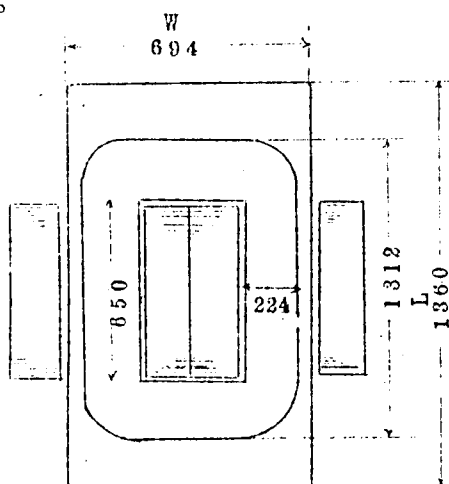


図 4.2-1 変圧器断面寸法

はいればよい、ということになつている。ワッシャー寸法，コイル寸法は第4.2-1図であるからこれらの寸法を(4.2-1)式にいれると

$$P_{\max} = 37.8 \text{ ton}$$

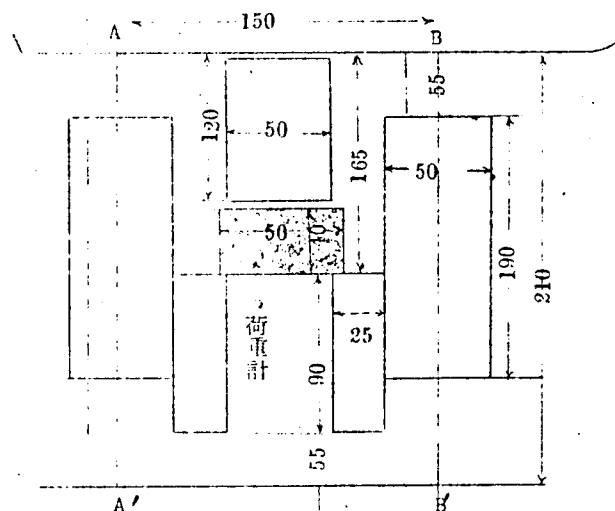
$$P_{\min} = 7.56 \text{ ton}$$

である。コイル群組立時の締付圧力は30tonでおこなったが，コイル厚さが小さいのでバンドがけはおこなわず，一度ゆるめた状態で鉄芯と組合せ，締付圧力はタンク附属の締付ボルトと50TON荷重計で再度締めなおしてセットした。

この場合は第4.2-1図よりもわかるように，締付ボルトを締めると鉄心のあるところだけかしまることになる。試験まえの鉄心内締付全圧力を5.22tonで締めたがこれは単位面積あたり  $3.58 \text{ Kg/cm}^2$  である。

コイルエンド部の締付力は，タンク壁とコイル群の間に打込む楔の効かせかたによつて大巾にかわる。#1～#2コイル間荷重計の荷重でチェックしたところ，115 Kgであつた。この値は鉄心を締付けても自由にしてもほとんどかわらず，楔だけできまる値と考えられる。#1～#2間荷重計の受圧面積は20  $\text{cm}^2$ であるから単位面積当り  $6.7 \text{ Kg/cm}^2$ である。

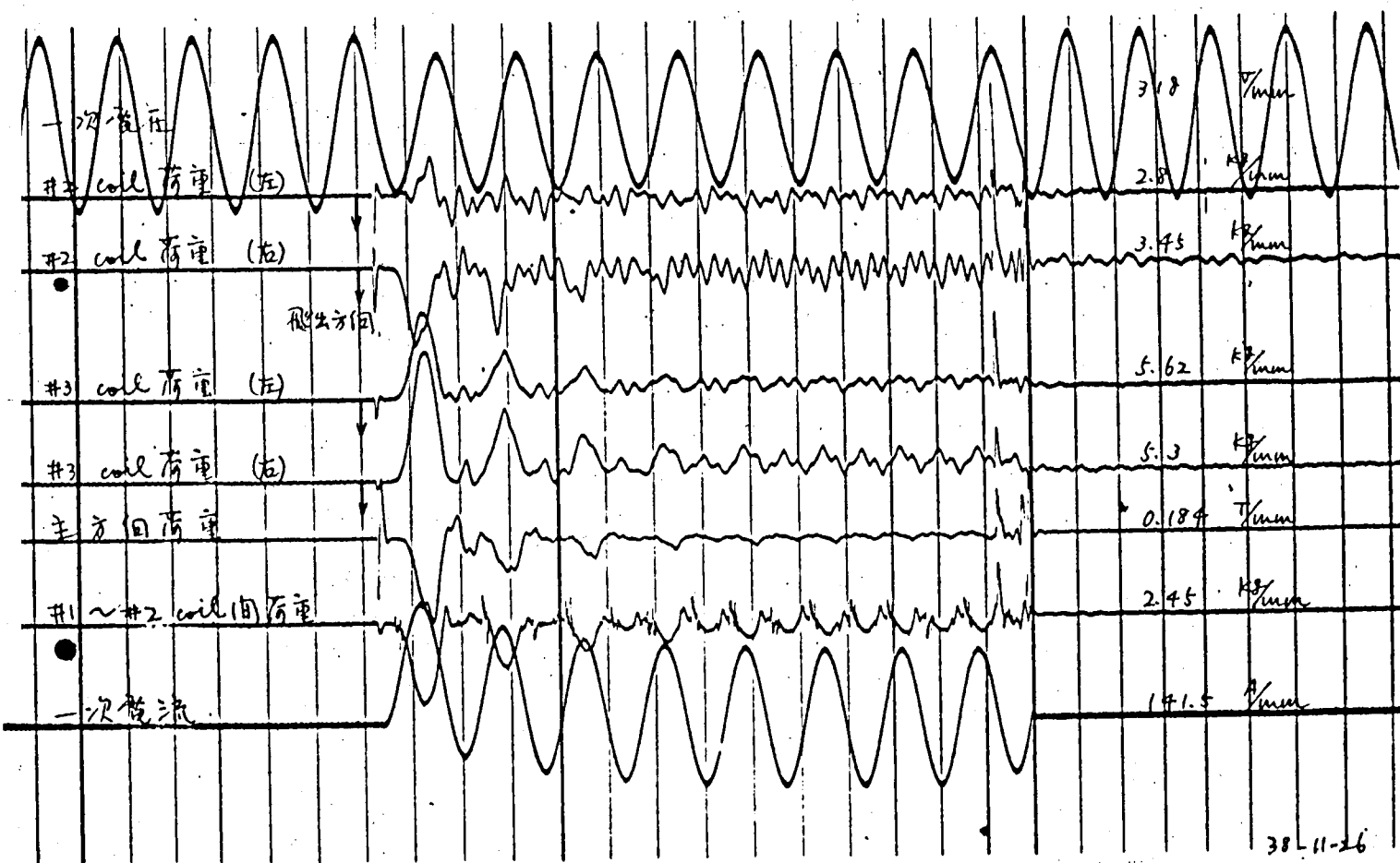
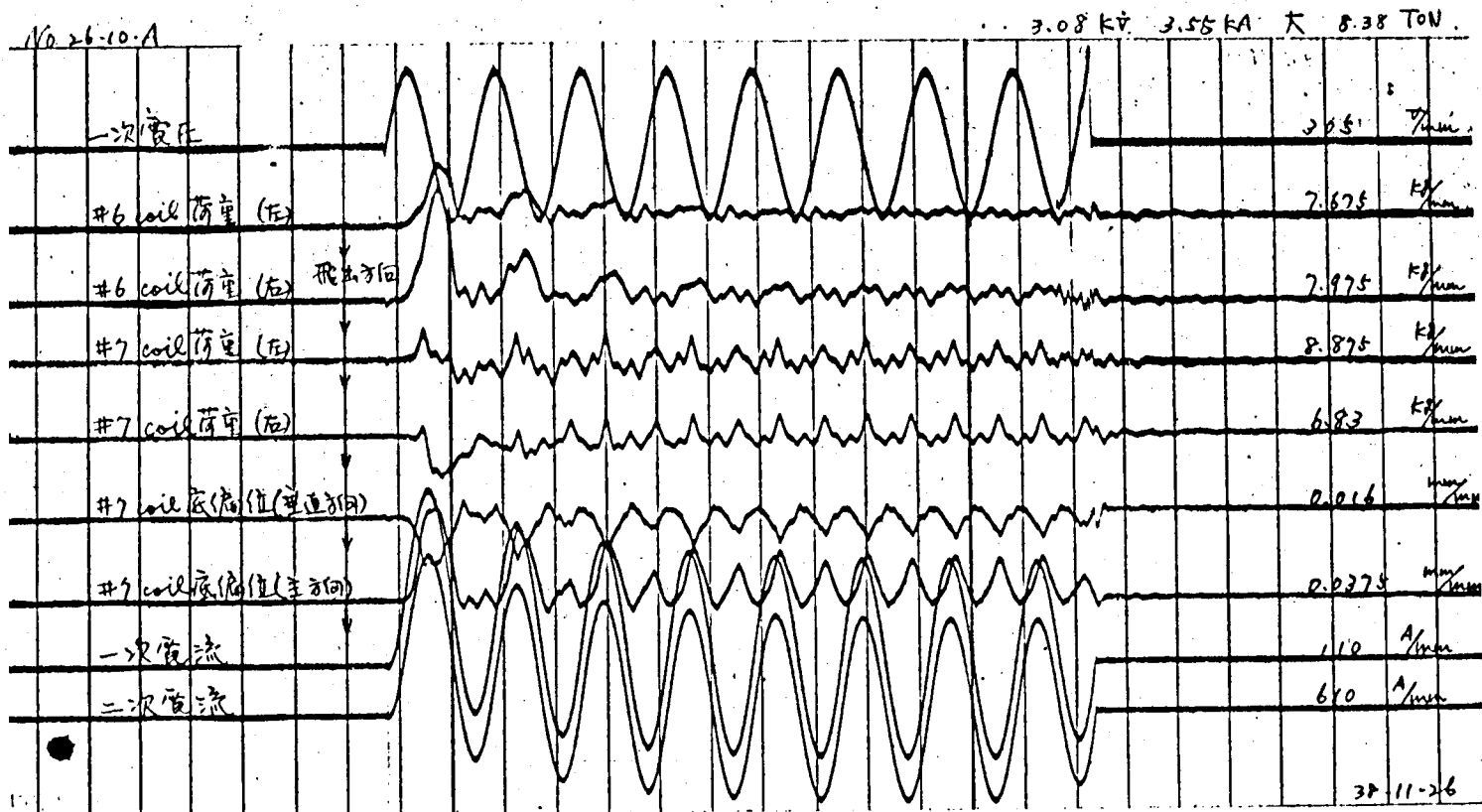
荷重計挿入場所である下部コイルエンド部分のカルタの貼付け状況は第4.2-2図のとおりであるが，AA' BB' 内におけるカルタ占有率は70%となっている。コイル中心線付近以外はもう少しカルタ数が少なく，50%程度と考えられるが，この比率で割れば，平均的な締付力をもとめることができる。



第4.2-2図 カルタ占有率

#### 4.2.3. 試験結果および検討

試験ケースは全部で38あるが，全部のオシロを添付することは煩雑になるので代表例のみを添付した。オシロは1ケースについて二枚よりなり2枚間の時間関係は一次電流でおこなえる。刻時用にはいっている縦線は，2台のオシロ間で同期がとれていないので時間間隔  $\frac{1}{100}$  秒の意味しか持っていない。試験条件はオシロ右肩上に，各エレメントの説明は左側線上に記入



※ 4.2-3 図 短絡試験波形

7.4.2-2表

交流短絡試験結果

(0-peak)

番号	一次端子 電圧 kV	一次電流 kV(peak)	電 圧 ト ラ ン ス ミ タ	実付力 TON	主方向	φ1-φ2	φ2 左	φ2 右	φ3 左	φ3 右	φ4 左	φ4 右	φ7 左	φ7 右	φ7相位 (AXI)	φ7相位 (RAD)	備 考
26-1	3.00	3.33	大	5.22	2700	25.7	53.1	26.1	61.8	52.7	94.8	148.5	-46.5	82.0	0.80	-0.14	
2	3.14	3.59	大	4.32	3410	35.9	53.6	39.3	104	144	122.8	198.2	-52.4	-49.0	0.73	-0.18	
3	3.15	3.61	大	3.98	3460	37.7	57.7	50.1	119	147	149.5	219.0	-57.7	-95.6	0.68	-0.16	
4	3.04	3.84	中	3.92	3610	37.5	77.9	41.4	88.9	145	153.3	181.8	-46.2	-95.6	0.72	-0.16	
5	3.10	3.66	中	3.78	3980	41.4	59.5	29.3	92.2	156	160.0	208.8	-53.0	-44.3	0.71	-0.18	
6	2.99	4.10	小	3.62	3980	42.9	91.0	37.3	123	187	170.6	227.0	-74.5	-126.5	0.75	-0.18	
7	2.49	4.15	小	3.54	3990	41.7	89.1	11.1	121	147	165.0	219.0	-55.0	-99.1	0.75	-0.19	
8	2.49	4.12	小	8.32	4010	43.1	61.1	25.2	95	165	129.7	211.0	-62.1	-163.8	0.72	-0.14	
9	2.96	4.31	小	8.56	4140	44.1	47.6	39.7	78.7	132	80.6	179.3	-26.6	-71.7	0.67	-0.18	
10	3.08	3.55	大	8.38	3200	39.7	21.9	54.5	99.5	140	91.3	169.0	-31.9	-47.8	0.64	-0.14	
11	3.06	3.56	大	測ラズ	3040	40.5	22.4	50.1	84.3	129	71.4	153.0	-23.1	-38.6	0.64	-0.18	
12	4.24	4.13	大	8.36	4720	52.3	35.4	47.5	128	179	110.0	232.5	-50.6	-75.0	0.75	-0.15	
13	4.24	4.91	大	7.38	8200	81.8	44.9	88.8	257	351	332.5	512.5	-84.3	-149.0	1.12	-0.21	
14	4.13	5.75	小	5.48							461.0	445.0	-168.5	-262.0	1.12	-0.20	
15	4.08	5.69	小	4.04	11100	100	84.4	170.5	443	573	502.0	617.0	-192.5	-181.0	1.13	-0.21	
16	5.42	5.86	大	3.58	13100	130	80.9	238	528	640	470.0	912.0		-394.0	1.45	-0.21	
17	5.44	5.88	大	2.20	16800	127	77.2	295	546	5.73	675.0	695.0	-248.0	-486.0	1.45	-0.29	
18	5.28	6.48	小	1.72	16800	144	29.8	200	634	531	706.0	862.0	-248.0	-394.0	1.39	-0.24	
19	5.25	6.44	小	0.56	16900	156	97.7	147.5	577	491	667.0	829.0	-230.0	-350.0	1.40	-0.24	
20	6.07	7.57	大	11.04	16300	191	124.0	236	812	712	964.0	1079.0	-312.0	-534.0	2.30	-0.33	
21	4.15	7.48	大	3.44	18200	192	130.0	220	543	714	893.0	1084	-286.0	-497.0	2.02	-0.48	
27-1	4.23	4.75	大	0.64	12900	114	69.0	144	421	445	387.0	408.0	-227.0	-346.0	0.99	-0.17	
2	4.23	4.75	大	0.56	12400	109	46.9	106	363	314	488.0	442.0	-210.0	-262.0	1.00	-0.19	
3	4.29	4.80	大	8.16	8160	107	20.1	163	398	378	492.5	458.0	-172.5	-182.0	1.13	-0.22	
4	4.29	4.91	大	7.68	8990	115	33.5	61.0	283	259	225.5	470.0	0	-182.0	1.14	-0.23	
5	4.25	4.91	大	7.94	9300	126	28.8	41.2					-136.0	-109.0	1.16	-0.30	
6	4.26	4.80	大	8.00	9220	112	35.5	42.6					-100.0	-102.0	1.13	-0.26	
7	4.27	4.89	大	8.00	9980	118			278	305	237.0	456.0			1.27	-0.22	
8	4.23	4.84	大	測ラズ	9820	107			398	398	303.0	356.5			1.34	-0.28	
9	4.27	6.49	大	8.16	16700	207	54.6	146	612	446	500.0	800.0	-177.0	-281.0	2.00	-0.30	
10	4.08	7.65	小	6.56	16800	235	59.8	208	790	646	783.0	1082.0	-287.0	-423.0	2.06	-0.26	

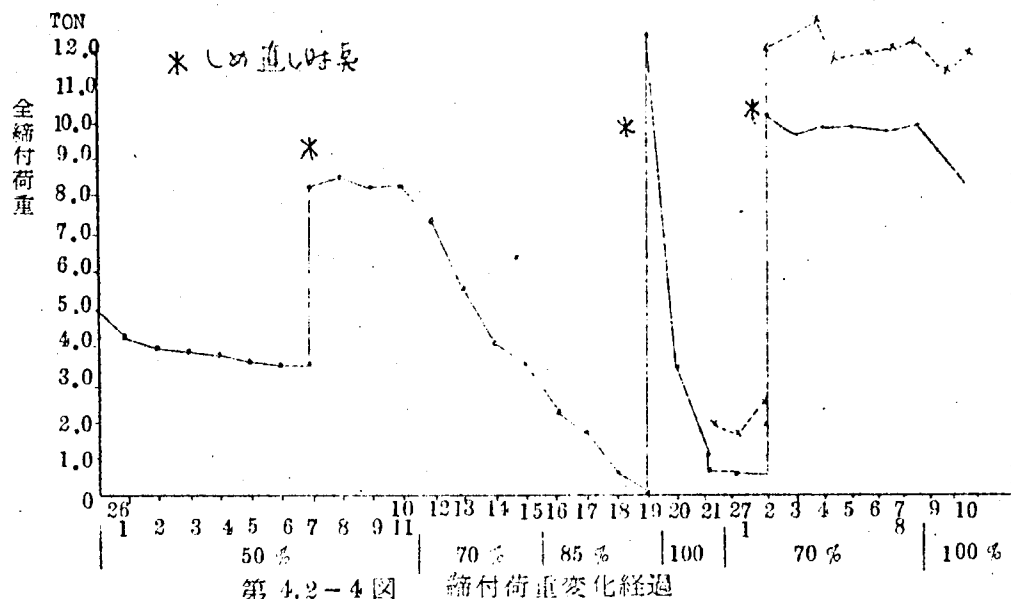


してある。50T側，とびだし方向の方向は第4.1.-3図測定および測定項目の図上に説明されている。感度はオシロ右側に記入した。

全オシロについて読取った結果を一覧表にしたものが第4.2-2表であり，第一波の波高値を短絡前を基準として0-Peakの値を示した。

### 1. 変圧器締付力

オシロの検討にはいるまえに，短絡による締付力の変化についてまづ検討してみることにする。



第4.2-4図は試験経過に伴う締付荷重の変化状況であって，試験条件は横軸下に記入してある。（詳細は第4.2-2表参照）

最初の締付荷重は前述のように5.22TONであったが，50%の短絡を7回つづけると3.5TONと67%までに減少した。減少は指数函数的であり，7回の短絡ではまだ完全に落ち着いてはいないようである。きわめて大胆な判断をくだすとすれば，

同一波高値の短絡電流によって生じる変圧器のゆるみは，時定数3～4回程度の指数函数的変化である。したがって10回の短絡後はほとんど締付力に変化は生じなくなるだろう。

No.26-8の試験まえに締め直しをおこない，締付力を8.3TONに増加して，締付力の影響をみるためにさらに50%短絡を4回つづけたが，締付力はまったく変化しなかった。

短絡電流を70%に増加させると締付力はふたたび減少する。試験回数を4回にとどめたために落ち着くまでの回数を確認することはできなかったが，50%のときと同程度と考えて間違いないであろう。すなわち

過去に遭遇した最大荷重以上の荷重をうけると，すでにゆるみが飽和している変圧器もふたたびゆるみ，ゆるみ量は指数函数的に変化する。

70%でゆるみが飽和するまでに短絡電流を85%に上げたためにゆるみはさらに増し、85%4回でついに締め付け荷重は0となった。

Na 20の100%短絡のまえに再び締め直しをおこない、11TON迄締め付けておいたが、1回の短絡で3.4TONまでゆるんでしまった。さらにもう一回短絡をおこなったところ1TONに減り、減少の度あいには電流が大きくなるほど急激になることがわかった。

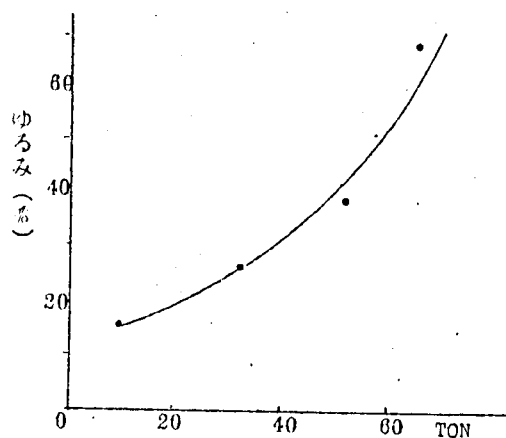
右図は最大電磁力にたいする、初回のゆるみ% (ゆるんだ荷重/短絡前の締め付け荷重) のグラフである。

Na 27-3のまえにもういちど締めなおして70%の短絡をおこなったがこの場合はぜんぜんゆるまなかった。

変圧器は短絡電流が大きい程急激にゆるむ。

過去の最大荷重以下の荷重ではゆるまない。

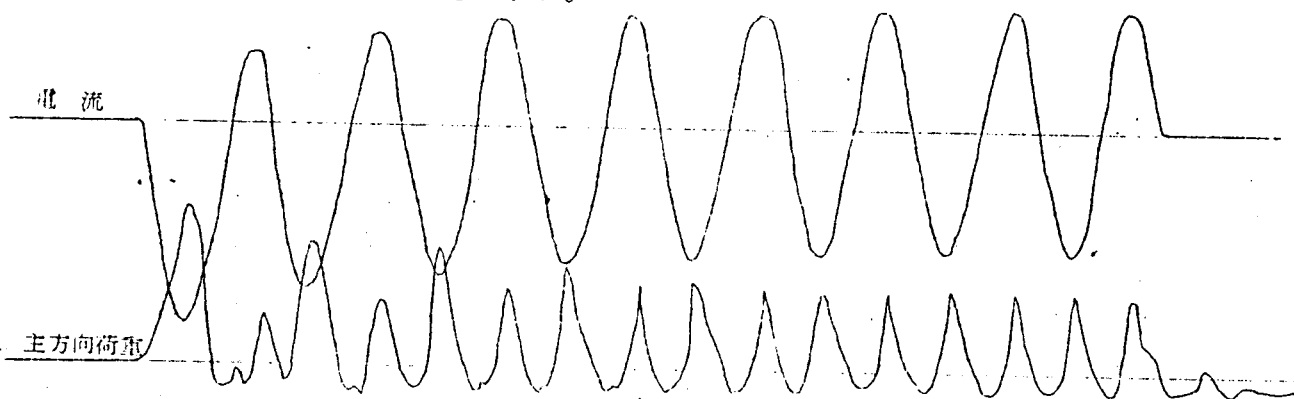
短絡によってなぜ締め付け力がゆるむかという点、これはプレスボートの残留歪によるものであるがこのことに関しては6章で詳述する。



第 4.2.- 5 図 過渡最大荷重

## 2. 主方向電磁力

測定法は先述のように、バットジョイントの鉄芯を通じ50TON LOADCELLを使用して測定した。代表的波形をつぎに示す。



第 4.2.- 6 図 主方向電磁力 (Na 26-20 オシロ)

この波形はNa 26-20で、100%電流短絡をおこなったところ、11TONの締め付けが3.4TONまでゆるんだときのものである。

回路力率0の回路を、投入位相0°で閉じたときに流れる電流は

$$i = A (\mathcal{E}^{-\alpha t} - \cos \omega t) \dots \dots \dots (4.2.-2)$$

であたえられるが電磁力は電流の2乗に比例するから

$$F = B (\mathcal{E}^{-\alpha t} - \cos \omega t)^2 \\ = B (\mathcal{E}^{-2\alpha t} - 2\mathcal{E}^{-\alpha t} \cos \omega t + \frac{1}{2}(1 + \cos 2\omega t)) \dots \dots \dots (4.2.-3)$$

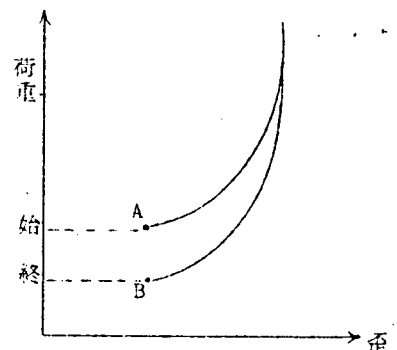
となる。この式をみると

1. 常数項
2. 減衰する常数項
3. 電源周波数と同一周波数で交番する項（時間と共に減衰する）
4. 電源周波数の2倍で交番する項

からなっている。今回の試験回路も力率はほとんどゼロで、かつ投入位相は位相制御をおこなうことによって電圧0近傍で投入されているので、主方向電磁力も忠実にこの4つの項をふくんでいる。投入瞬時の電磁力がもっとも大きく、最初は60%成分が非常に多く含まれているが、電流の直流分の消滅する4サイクル目では完全に減衰している。

位相関係に注目すると電流の2乗と一致せず、わづかに主方向電磁力のほうがおくれている。これは駆動電磁力の位相は原理的に電流と同位相であるはずである。ところが測定しているのは、電磁力を受けたコイルがプレスボードを通り、鉄心をかいして、荷重計に働いた力である。鉄心の剛性は非常に大きいので偏位無じて力を伝えるが、プレスボードの剛性は非直線であって、荷重の低いあいだは剛性がきわめて小さく、力をつたえるためには相当量の偏位を必要とする。したがってコイルが電磁力を受けても、プレスボード、鉄心にはコイルの移動する時間遅れののちに力が伝わっていくので、電流位相とは位相差を生じるものである。

第4.2-6図で荷重の始と終りのゼロレベルに差を生じているのは、最初のピークでプレスボードに残留歪を生じ締付力がゆるんだためである。プレスボードの性質を簡略



第4.2-7図 プレスボードの性質

化すると右図のようになる。最初A点の荷重、重で締付けられていて、大きな荷重をうけると、プレスボードは非直線な剛性を示して曲線は上昇するが下降するときは上昇とはおなじ道をとらず、下廻る曲線をえがく。いっぽう鉄心の窓枠寸法はきまっているから、歪量は変化することができないので、荷重が減少することになるわけである(B点)。

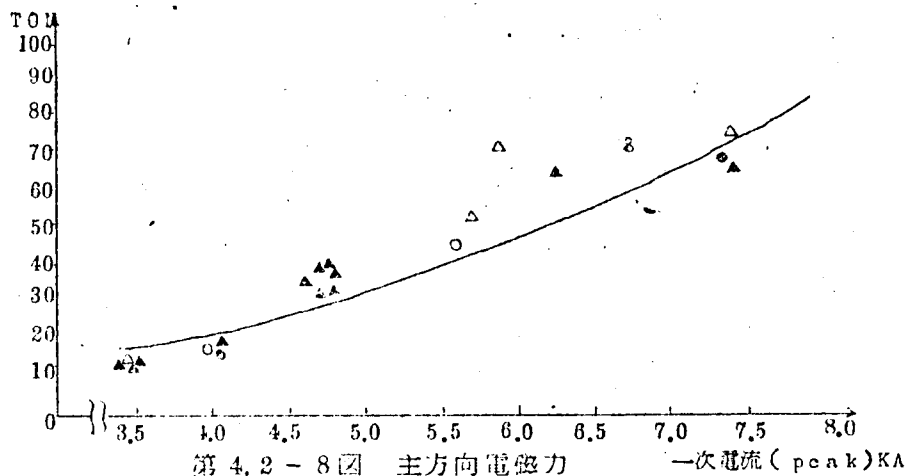
主方向荷重の波形は、(4.2-3)式であらわされるような正弦波ではなく三角波であるが、これはプレスボードの性質が荷重の大きくなるほど急激に剛性が増す性質であるためと考えられる。電磁力と荷重の間に位相差を生じる当然の結果として、荷重は締付力以下にも下りうる。

短絡電流の大きさにたいする主方向荷重の大きさの関係は第4.2-8図に示すとおりである。この図は投入瞬時の電流対荷重の特性である。荷重はほぼ電流の2乗の曲線にそって上昇するが、電流が大きくなってくると頭打ちになるような傾向がうかがえる。同一電流にたいする荷

重は相当大きくバラック。

これは短絡時の変圧器の条件が完全に同一でないために生じるためであるが、短絡まえの締付荷重とはあまり密接な関係はみとめられていない。

第 4.2 - 8 図では、



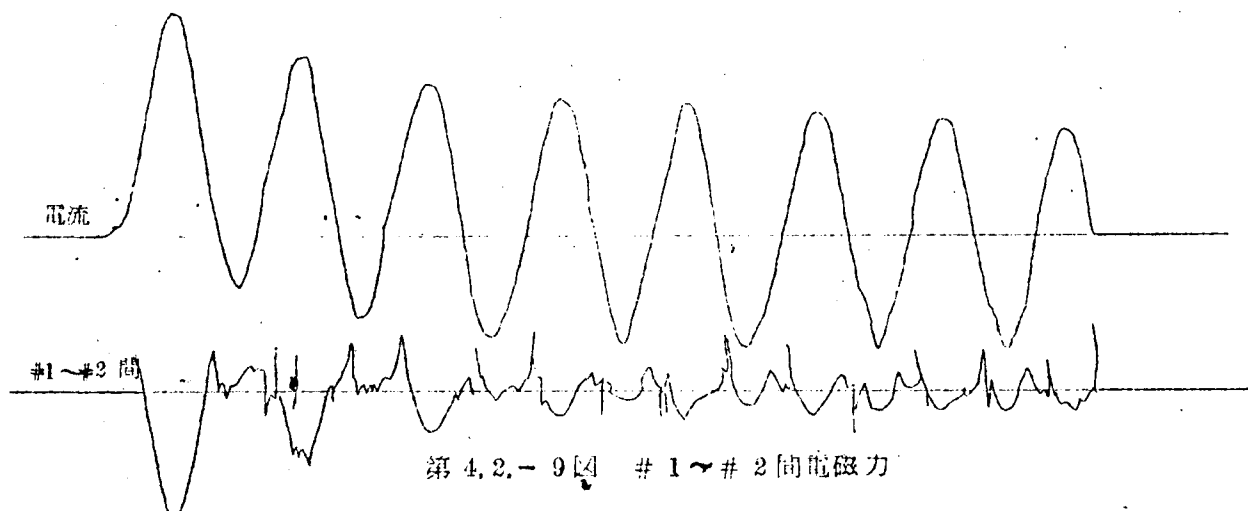
- 最低タップ, 締付 5 TON 未満    ⊙ 最低タップ, 5 TON 以上  
△ 最高タップ,                      ▲ 最高タップ,                      ♯

と区別して記入したが、5 TON 以上の締付のほうに荷重が多いとはいえない。

抵抗紙模擬によってえられている主方向電磁力の推定値と実測値とはほぼ一致している。

### 3. # 1. ~ # 2. 間電磁力

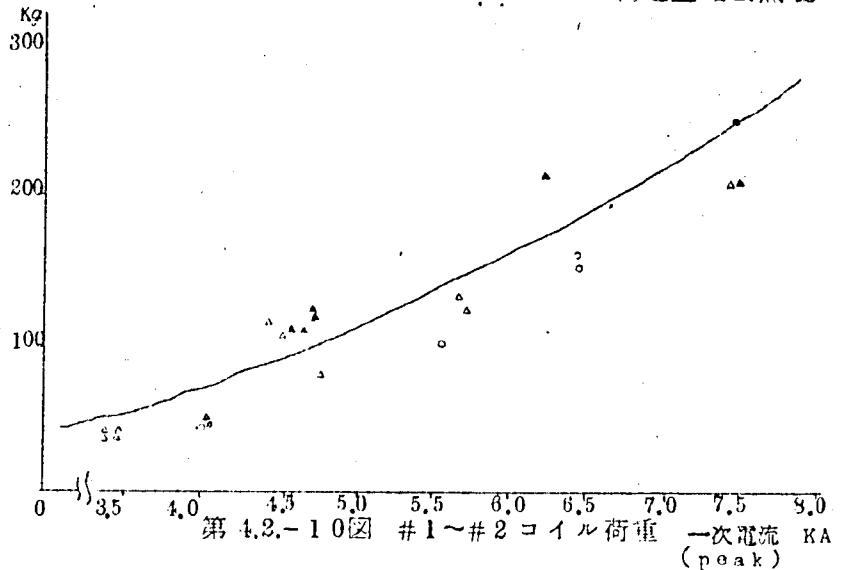
測定は第 4.1. - 6 図に示すようなシガレットケース形のコイル間荷重計をもちいておこなわれた。波形の一例を示すと次図のようになる。



このオシロは No. 26 - 8 のオシロで、電流 50 A のときのものであるが、ほかのケースも大同小異である。電磁力は電流の 2 乗に近い波形をしているが多少位相的にはおくれしている。50 TON 荷重計と比較するとおくれの量は少い。# 1 ~ # 2 間の荷重計には、静的に考えると、# 1 コイルと # 2 コイルにそれぞれ働く電磁力の差が表れるものであるが、主方向電磁力の場合とどうよう、コイルの運動をともなつて荷重がかかるので、位相的なズレが生じるものと考えられる。位相差の存在する当然の結果として、荷重は負方向にも振れうる。荷重計には静的に、 $6.7 \text{ kg/cm}$  程度の荷重が組立て時にかけてられているので、この分が食われることになる。波形は 50 TON 荷重計とことなり細いヒゲがでているが、これはコイルが衝撃的にぶつかる

きに荷重計が寄生的に振動するのではないかと考えられる。薄形にするために構造上相当無理をしているのでやむをえない。

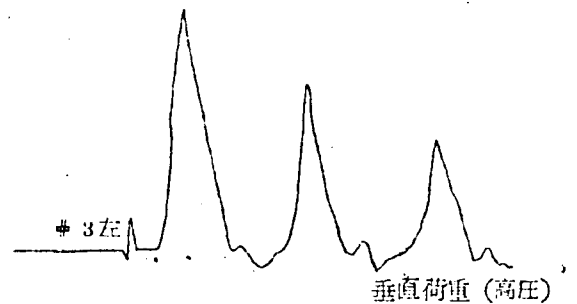
第4.2-10図は一次電流  
- #1~#2間荷重特性である。 $\Delta$ ,  $\circ$ は主方向と同じ符号を使用してあるが、縮付荷重、タップによる差は、顕著にはあらわれていない。曲線は抵抗紙模擬により求められた推定値を書き入れたものである。



ある。ただし、荷重計には、荷重計の表面積20cm<sup>2</sup>の分だけの荷重がかかるものとしている。この荷重計を入れた周辺のカルタの占有率は70%程度であるので、この逆比でコイルに働く電磁力が表れるとすると、曲線は140%高いところになる。

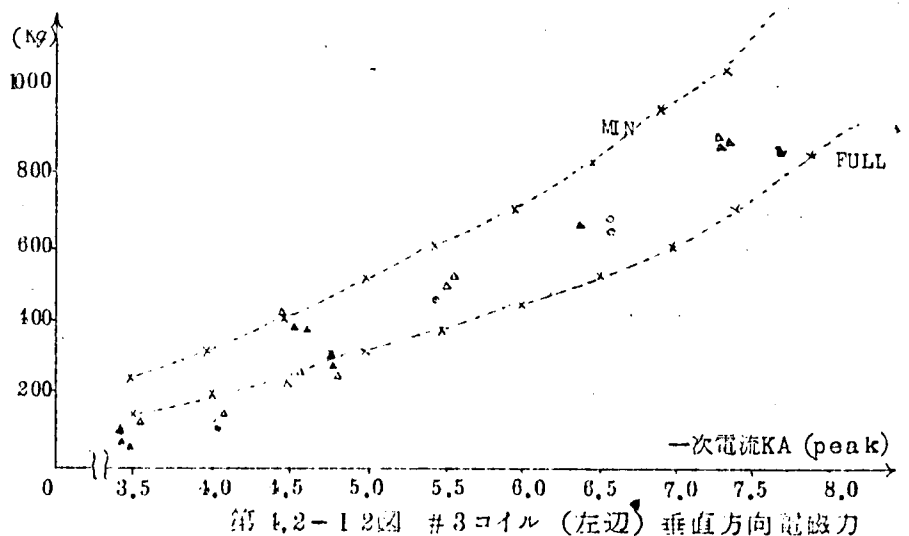
#### 4. 垂直方向電磁力

測定はコイルに吊上げバンドを掛け第4.1-5図の荷重計をもちいておこなった。波形は、第4.2-11図の如く電流の2乗に比例し、位相差はほぼ主方向電磁力と同じである。また短絡電流の増加にともない発生電磁力も増加し、模擬で求めたKg/Mに、コイル巾中央の長さをかけて得た値を、垂直方向電磁力としてグラフの上に曲線を引いてみると、大体一致している。(第4.2-12図)



第4.2-11図 Na26-20オシロ

低圧コイル#2, #7に関しては高圧コイルとはちがった様相を呈している。電流の2乗とはおおよそかけはなれた波形であり、直流分が一杯に含まれた電流であるにもかかわらず、第一波の電磁力はさほど大きくなく、



60%成分も小さく、ほとんど120%だけである。模擬との一致性も悪く、実測のほうがは

るかに小さい。

この傾向は#2左においてもつともはなはだしい。

なぜ高圧コイルはわりあいよく一致し、低圧コイルでは合致しないかいまのところでは不明である。

考えられる原因としては、

1. 高圧は引張りで荷重計を使用しているのに比し、低圧は圧縮に使用することになつている。

吊上バンドは圧縮になると Backling を起すのかもしれない。

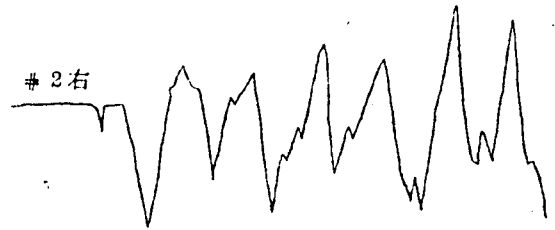
2. 垂直方向電磁力をこのような方法で測ることに疑問もある。コイルは矩形の一つものであるので、コイル底の辺に働く電磁力も上辺にまで力をおよぼすのかもしれない。
3. わりあい剛性の弱いコイルを、2点でささえて左右の区別のつくものか、また多層梁であるコイルの、揺みとの関係も不明である。
4. #2の右辺は推定とは力の方向が反対である。理由は不明であるが、タンクが短絡時にも飽和しないものとして模擬は切り抜いたために、模擬と実際が一致しなかつたためか？
5. 電磁力の分布の形が第3.6-4図(A)のように、大部分がとびだし方向に働き、端の一部だけがひっこむ方向であるのに比し、高圧はコイル中央にあつまるような分布であるためかも知れない。

これらに關してはこんどの研究にまたざるをえない。

## 5. コイルの運動

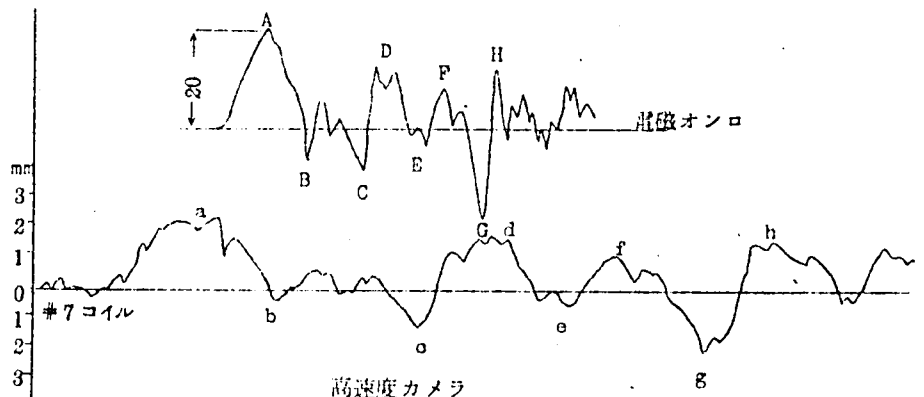
測定は前述のような片持梁式の抵抗線歪計式の偏位計と、高速度カメラによつたが、偏位計の固有周波数は188 $\sim$ とわりあい低いために、忠実に偏位をあらわすかどうか心配されたが

高速度カメラの駒読みと比較した結果よく現象に追隨していることがわかつた。第4.2-14図は両者の波形を示したものであるが、ピーク、ピークのあらわれかたは完全に一致しており、波高値も10%の精度で一致している。いっぽう高速度カメラの読出し精度は実物スケール上で $\pm 0.2$ mmであつた。この



垂直荷重 (低圧)

第4.2-13図 №26-20 オシロ



第4.2-14図 高速度カメラとオシロの比較

結果は、無作為に順序づけした非常に似かよった像をくりかえし測定した結果えられた。絶対寸法は映写像の視野によってきまるので一般的な値に換算すると、駒寸法（16mm）の $\pm 1.50$ が誤差としてはいりうる。

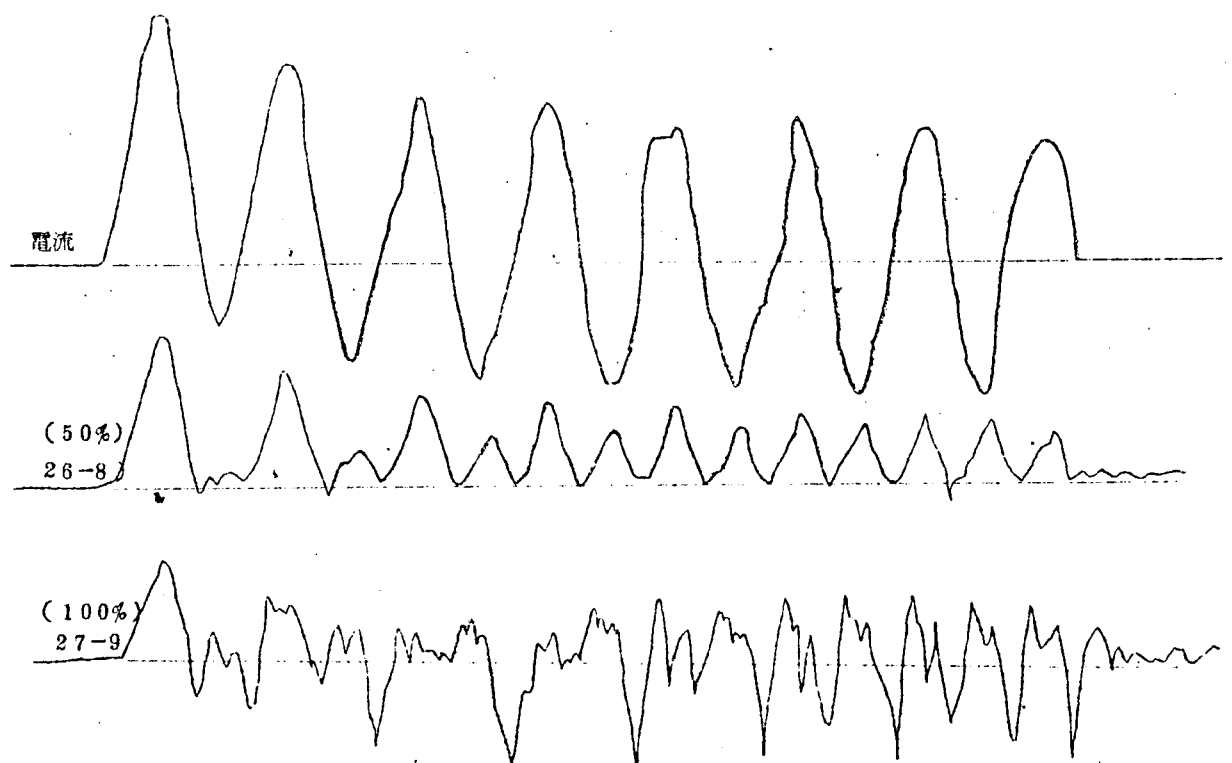
コイルの運動を詳細に検討すると非常に複雑な動きをしている。運動方向は

1. 主方向電磁力と同一方向（即50TONロードセル方向）
2. 垂直方向電磁力と同一方向（即飛び出し、引込む方向）
3. コイルの巻き線にそった方向

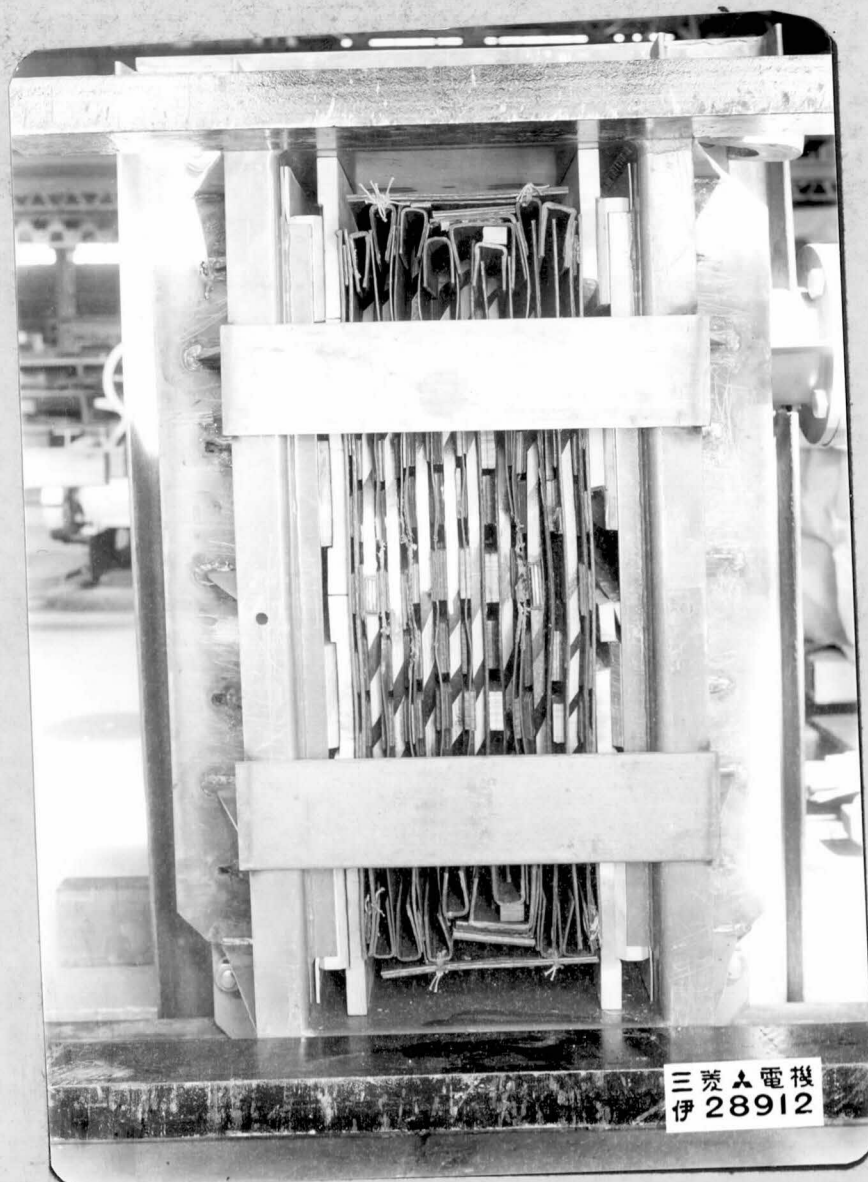
の3つがあるが、1, 2, は偏位計で測定し、1, 3は高速度カメラで観察できる。

第4.2-15図は短絡試験後のコイル底の写真と、高速度カメラの一駒を示したもので、高速度カメラはコイル#5, 6, 7, 8, の4枚をクローズアップで撮影した。写真上部の目盛は基準スケールで、1目盛（1DIV）10mmである。

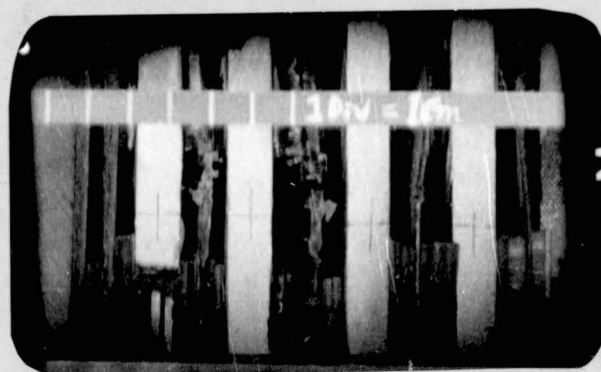
主方向のコイル運動は主方向電磁力と非常に似た波形をしている。



第4.2-16図 主方向コイルの運動



第 4, 2. - 1 5 A 図 モデル変圧器 底面



第 4, 2. - 1 5 B 図 高速度カメラ撮影 視野



才4.2-17回

コイルの運動

高速反力53. NO.26-20)

#5

巻き方向運動

#6

座列見上

#7

#8

5  
4  
3  
2  
1  
0  
感度

主方向運動

50TON側

#5

#6

#7

#8

時間 m sec

過渡時

定常時

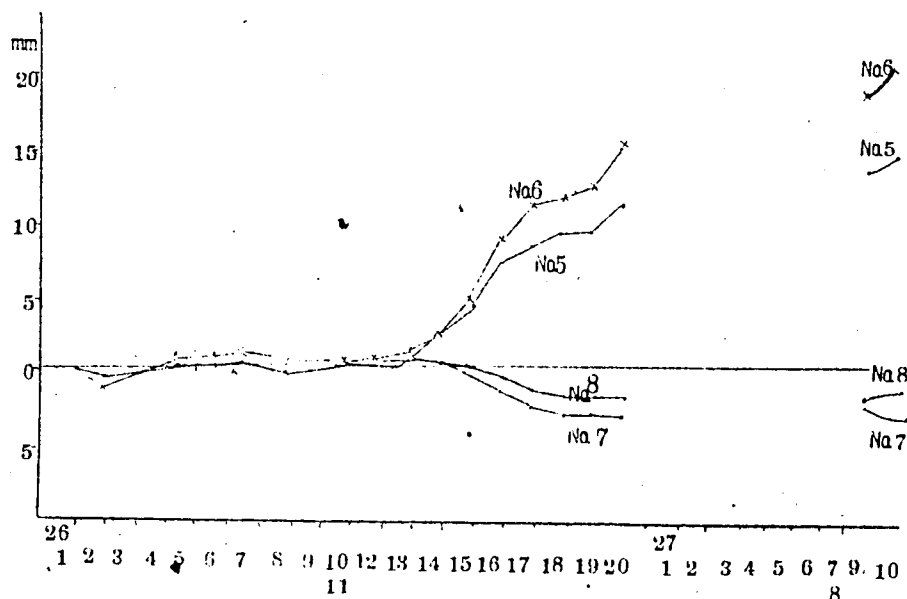
0 5 10 15 20 25 30 35 40

120 125 130 135 140 145 150

第 4.2-16 図は代表的な二ケースの波形をならべてえがいているものである。電流の小さい (50%) あいだは主方向電磁力とまったく同じ波形をしているが、電流が 85% 以上になると、電磁力とはちがつた動きをする。すなわち低圧 #7 コイルは短絡まえの位置より大きく高圧側 (#6 側) にはいりこんでいる。第 4.2-17 図はこれらのようすを図示したもので、高速度カメラの駒読みをおこなったものである。短絡まえの静止位置を基準にして考えると、#5、#6 と #7、#8 はおたがいに離れるように運動するが、おたがいの位相関係に差を生じ、低圧側のほうがさきに高圧側にはいりこんでいる。電流が小さいあいだは、このような現象が生じないであるといど大きくなるとなぜ発生するかを考えてみるに、鉄心内のコイル配置は、設計上は磁気中心が合致していてほとんど垂直方向電磁力は発生しないことになつてゐるが、実物トランスでは工作精度のうえから、かならずしも図面どおりにつくられてはおらず、数 mm ~ 10 mm 程度の誤差がはいっているものと考えられる。したがつて短絡電流によつて惹起される電磁力が締付による摩擦力にうち勝ち、またコイル、鉄心間のチャンネルにギャップがあれば、コイルは動きうるわけである。たとえチャンネル部にギャップがない場合でも、プレスボードの弾性によるタワミ量だけ動きうるものであり、また力が大きくなると坐屈破壊をおこして動くことになる。鉄心内磁気中心のズレが最初小さくてもだんだん破壊は進転し、それにともない磁気中心のズレも大きくなりついには変圧器の絶縁を脅すことになる。鉄心内垂直方向の動きはコイルエンドにおいて観測すれば、コイルの巻き線にそつた方向の運動としてみることが出来る。第 4.2-17 図には、この方向の読出し結果も示されているが、主方向の運動よりはるかに大きく (約 3 倍, 6 mm)、かつまた、波形は電流の 2 乗波形にきわめて忠実であることがうかがえる。また短絡前と短絡后では、コイル位置にズレが生じていることが 0 ラインの移動より明かなとこ

ころである。

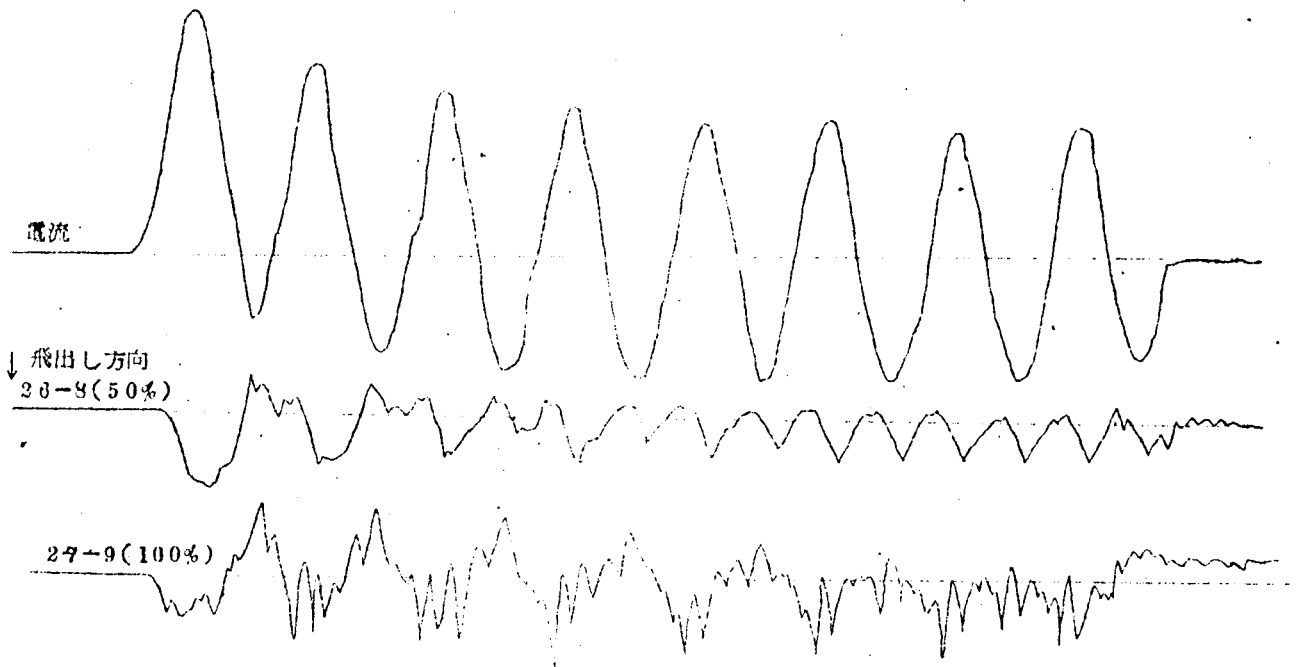
第 4.2-18 図は、試験ケースが進むごとにコイルがどのように移動していつたかを示したものである。



第 4.2-18 図 コイル巻き方向の移動

このデータは高速度カメラ撮影のときにコイルに付けた十字の移動を、試験前後について測定したものである。今回の試験では、組立時より最大20mm程度の移動を生じている。移動は85%電流より始まり、一回の短絡で3mm程度動いていたが、あとではだんだん移動量はすくなくなっている。破壊しやすいところはさきにこわれ、だんだんこわれにくいところが残ってくるためと考えられる。

飛び出し方向の動きの代表例を才4.2-19図に示す。電流値が50%のときには電磁力にしたがつたうごきをしめすが、85%以上になると急に波形が乱れるが、これも鉄心内のコイルが垂直方向に運動するために、その影響をうけているものと考えられる。偏位計接触点が完全に平行運動をすれば、コイルが巻き方向に動いても飛び出し方向には変化は生じないのであるが、コイル底部は直線ではないので、あたかも飛び出し方向に動いたようなゴーストが真の動きに重畳し、第一波の波高値が電流に比例して増大してこない。



才4.2-19図 飛び出し方向 コイルの運動

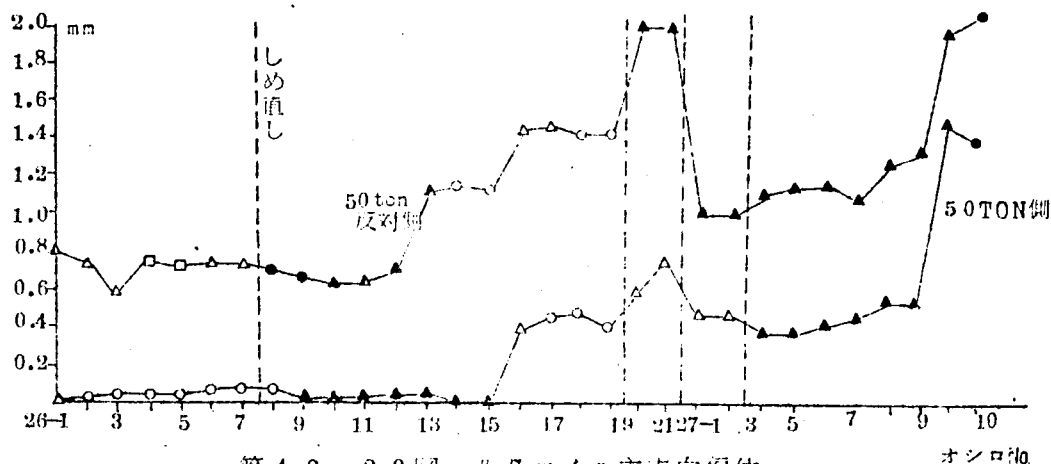
100%の電流の場合の波形に400サイクル程度の高周波成分が重畳しているのは、偏位計接触点が巻き方向運動のためにこすられ、偏位計の固有周波数432Hzが寄生振動をおこしていると解釈される。

主方向 偏位最大値の試験経過による変化状況を示したものが才4.2-20図である。

(#7コイルに対してのみ)。

短絡試験ごとに垂直方向の移動距離を全コイルについて測定したが、移動量の最も大きかったのは#3コイルで、約3mm凹んでいた。

以上のように外鉄形変圧器のコイルは短絡時には相当大きな運動を行なうことが判明したがこの運動は変圧器にとっては害こそあれ、けつして益のあるものではない。



第4.2-20図 #7コイル主方向偏位

主方向の運動は、高、低圧コイルがたがいにくっつき合うために、コイル素線は電磁力の外にハンマリングによる運動エネルギーの分まで応力を受けることになり、しかも低圧、高圧コイルの位相がずれているために運動距離がプレスボードの圧縮量よりも長くなり、くっつき合うときの速度が増して力積が大きくなり、素線の受ける応力は大きくなる。また締付力、コイル重量の如何では、コイル群の固有周波数が120サイクル、60サイクルの近傍に近づく可能性もあるわけで、そのときはきわめて危険な状態になるものと予想される。これらのことに関しては第6章 コイルの構成材料、および第7章 電子計算機による検討のところで詳しく論ずることとする。ちなみに、今回のモデル変圧器では固有周波数は、200サイクル程度である。垂直方向電磁力による運動に関してはコイルエンド部ではとくに危険を感じることはなかったが、鉄心内の垂直方向の運動が問題である。鉄心内は、設計上は磁気中心のズレはないようになっているが、垂直力を支えるものは現在の設計では入っていないので、一旦ズレはじめるとコイルエンド部のタンクウェッジの摩擦係数だけで持たなければならず、非常に動きやすい。なぜならば、コイル間の摩擦は高圧群、低圧群内には存在するが、高低圧間には存在しなくなるからである。高圧はお互に一つに集まる方向に電磁力が働くので高圧コイル間には摩擦力はあるが、高低圧間は完全にギャップができるために摩擦力は生じない。第4.2-15A図を詳細に検討すると高圧コイルはワッシャー、カルタとも上方に移動しており、このことを実証している。

垂直方向の運動が激しいと、コイル自体の機械的強度が充分であったとしても、コイルと鉄心間のチャンネルなどの絶縁物が短絡のたびにコイルによってたたかれ、コイルも絶縁物も傷を

受けることになり危険である。これを防ぐ方法としては組立て時にとくに注意して、鉄心内の高、低間の平均的磁気中心のズレのないようにすべきである。すべてのコイルの中心を合わせることができれば最良であるが、不可能のときには平均値だけでも絶対に合わせるべきである。高圧、低圧の向き合ったコイルは当然最も大きな電磁力を受けるわけであるからこの2枚の磁気中心も同時に合わせる事が望しい。

磁気中心を合わせるもののほかに、万一多少のズレがあっても、それが進展しないような構造も考えるべきであろう。とくに鉄心内の垂直方向の遊びを殺すように、たとえばコイル外周と鉄心との間に楔を打込む、と云うような方法をとるべきであると考えられる。

また一案として初期締付力を強くして電磁力以上にしておけば、主方向、垂直方向ともに問題はなくなるわけであるが、実際上は変圧器の組立から考えて不可能である。ただし、この時は共振の問題を考慮にいれておく必要がある。設計いかんによっては締付力は高ければ高いほど良いとはいえない場合がある。

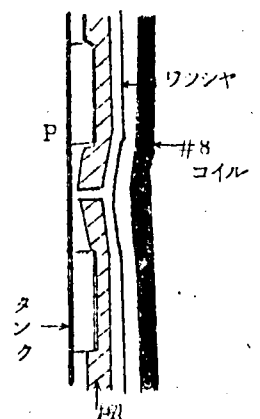
コイルエンド部はつなぎの関係で中心を合わせることは不可能であるが、しかしこの部は組立時にタンクウェッジで充分垂直方向に効かすことができるので、電磁力に対する梁としての強度が持てば、運動そのものはあまり大きくならないと考えられる。

(コイルの巻線方向の運動は鉄心内の垂直方向のズレであると推定したのは、試験後の分解点検により、コイルプレスボードの傷みより明瞭であった。)

コイルの運動の振巾とプレスボードの剛性との関係を比較したところつぎのことがわかった。コイルは、きわめて大きな剛性を持つ鉄心もしくはタンク壁によって四周を囲まれているので運動するためには、コイル間に介在するプレスボードを圧縮して動かなければ運動することができない。高速度カメラおよび偏位計より主方向の運動の振巾を計算すると、100%短絡時には#7で2.5mm #6で5mm程度もあり、プレスボードだけの遊びとしては大きすぎるので、高速度カメラの写真を再検討したところ、短絡電流最大近傍で、#8コイル側の木製楔が1.3mm動んでおり、#1コイルは#3側に4mm振れている。モデル変圧器の楔は木製で、しかも木の目が横方向に通っているために、右図のようにPなる点はコイルの外向きの力に対して剛性がきわめて弱く、大きく撓むものと考えられる。

第4.2-15A図の右側#1コイルについても同様のことがいえる。右側の楔は電磁力に抗し切れずに割れてしまっており、#1コイルは撓曲が残っている。

この変圧器の電磁力の模擬結果では、高圧コイル4枚は中央に集る方



第4.2-21図  
楔の変形

向に働くが4枚の力の総和は0にならず、4TON程度の力が残る、コイル#1向に働くので、#4のコイルも写真上、右に動くことになったと解釈される。

#### 6. コイルの残留歪

短絡試験前の計画段階では、変圧器コイルは、垂直方向電磁力による破壊が起るものと予想を立て、コイルエンド部が凸形に飛出してくるのをコイル素線の残留歪によって検出しようとしたが、この変圧器は垂直方向の強度が強く残留歪は全然現れなかった。

### 4.3. 故障検出

短絡は変圧器にとつてはきわめて苛酷な条件であつて、とくに繰り返し短絡を受けるもので、永久に破壊しないというような変圧器の設計はきわめて困難なことである。しかし、万一変圧器内部で事故を起すような事態が生じた場合には、損傷も大きく、したがつて損害額もばく大なものになることが予想されるので未然に予防することが必要である。変圧器が短絡強度の点で事故を起すのは、適切な設計のもとに造られた物であれば、ただの1回で突発的に発生することは先づなく、繰り返し短絡によつて、じょじょに危険な状態（絶縁破壊）に進展していくものであることが、短絡試験結果および大電力試験設備用短絡変圧器の使用実績から推定されている。そこで、つねに、変圧器の健康状態を非破壊的に、簡単にチェックする方法があれば、事故を未然に防ぐことも可能であろう。（たとえば増締めを行なうことによつて）。また長年月使用の末であれば解体修理という方法も考えられる。内部短絡事故を起して本体全部を駄目にするよりも、はるかに得策であろうから。

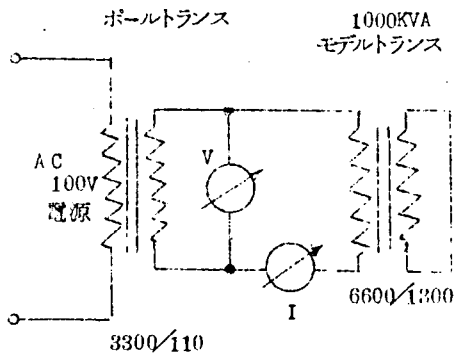
#### 4.3.1 モデル変圧器による実験

故障検出法は非破壊的にかつわりあい簡単に実施できることが望まれる。変圧器が生きた状態で行なえるものであつて、常時監視できれば申しぶんないが、定期点検時に停電させて実施する方法でもやむをえないと考えられる。交流短絡試験に用いた方法は下記の3つである。

- 1) イムピーダンス
- 2) キャパシタンス
- 3) 共振周波数

このほかに、巻線抵抗も参考として測定した。銅線の一部にきわめて大きな傷が発生したり、また全体に大きな残留歪が残れば抵抗値が変化するのであろうと予想したが短絡による温度上昇にともなう抵抗値の変化のほうが大きかつた。測定回路はつぎに示すとおりである。

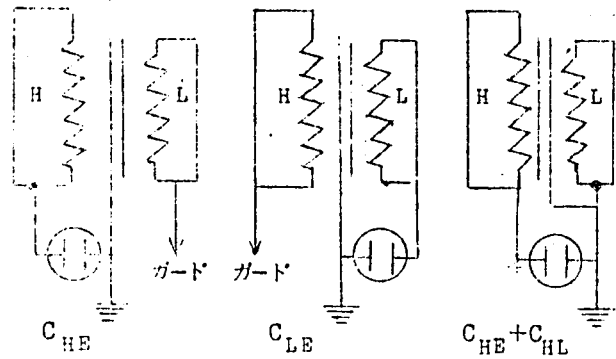
1) イムピーダンス



第4.3-1図 イムピーダンス測定回路

2) キャパシタンス

三菱電機製 SCB-1型 シェーリングブリッジを使用した。



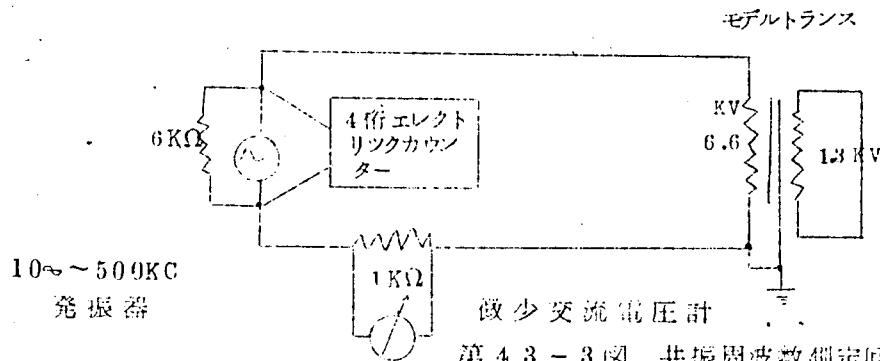
第4.3-2図 静電容量測定回路

$C_{HE}$  : 高圧-鉄心間容量

$C_{LE}$  : 低圧-鉄心間容量

$C_{HL}$  : 高圧-低圧間容量

3) 共振周波数



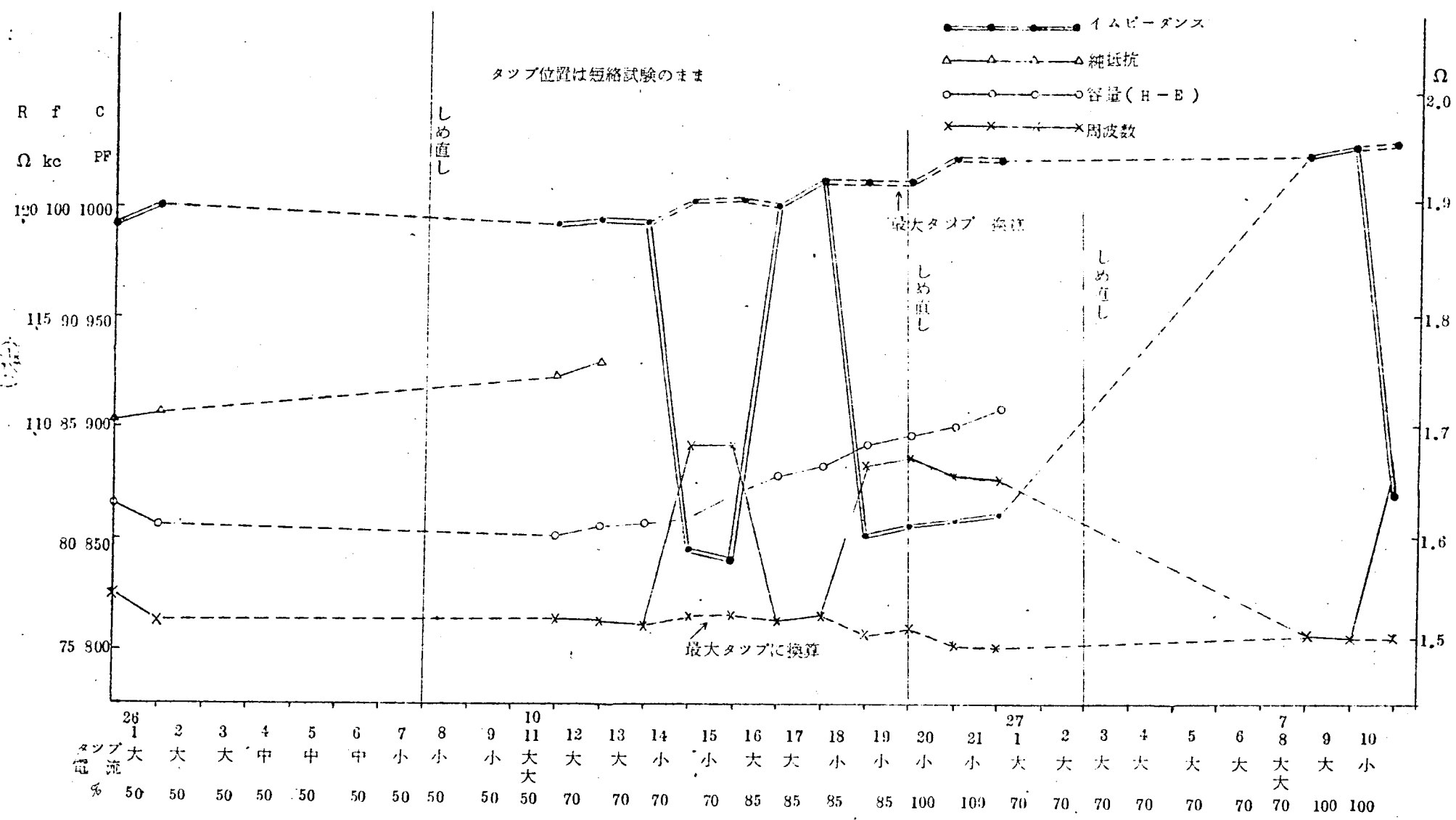
第4.3-3図 共振周波数測定回路

発振器の周波数を変え、交流電圧計の指示が最大になる周波数を4桁電子管式カウンターで読取った。

短絡試験の前後に測定した結果は第4.3-4図に示すとおりである。測定は短絡試験のタップ位置のまま行なつたのでグラフは最大タップに換算した値も記入しておいた。(試験番号27-10後の測定は最小タップと最大タップの両方で行なつたので差を求め、最小タップの測定値とではその差の分だけ補正した。)

試験時間短縮のために測定を行なわなかつたケースもあり、また静電容量も高圧-鉄心間しか測定しなかつたが、短絡をくりかえすごとに、イムピーダンスおよび静電容量は徐々に増加している様子が明瞭にみとめられる。しかもこれらの変化はNo 14のケース、70%最小タップから始まっているが、これは前述の鉄心内コイルの移動の始りと一致しており、また増加の傾向も一致していることから、交流短絡時のイムピーダンス、静電容量の変化は忠実にコイルの垂直方向

第 4.3 - 4 図 変圧器短絡試験 容量 周波数イムピーダンス純抵抗変動状況





の移動を表していることがわかる。試験ケースNo 14の後とNo 21の後のデーターを比較すると次表のようになる。

第 4.3-1 表 故障検出感度

	No 14	No 21	差	相対変化率
コイルの移動量			約 15	—
イムピーダンス	1,589 Ω	1,619 Ω	0.03 Ω	1.9%
キャパシテイ	859pf	908pf	49pf	5.7%
共振周波数	84.16KC	82.71KC	1.45KC	1.7%

この表より、高圧—鉄心間の静電容量の変化率が最も大きく、イムピーダンス、共振周波数の変化はコイルの垂直方向の移動（鉄心内）にたいしてわりあい鈍感なことがわかる。

固有周波数は一般に

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{であるから}$$

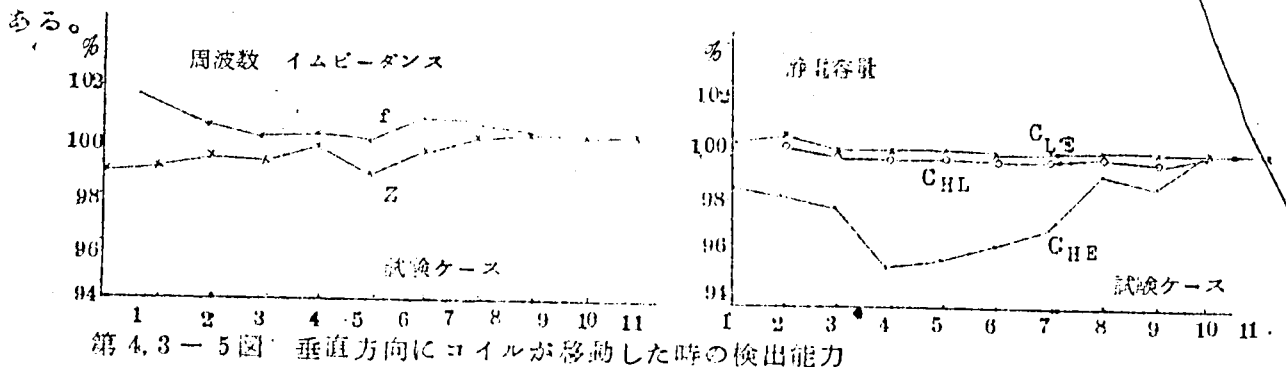
周波数の相対変化率は

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta L}{L} - \frac{1}{2} \frac{\Delta C}{C} = -\frac{1}{2} \left( \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C} \right)$$

で与えられ、イムピーダンスおよびキャパシタンスの相対変化率の平均で与えられるはずであるが、実測の結果は一致していない。これは共振周波数を決定するLおよびCは、漏洩インダクタンスおよび高圧—鉄心間容量では表現されないのかも知れない。とくに共振周波数を求めるときには高圧側の一端を接地に取っているが、シェーリングブリッジで高圧—鉄心間のキャパシテイを求めるときは両端とも浮いており、また共振周波数を求めるときには、高圧—鉄心間の外に高圧低圧間の容量も含まれるためではないかと推定される。

そのほか、周波数の測定感度が鈍いのではないかと疑われる。検出器に周波数選択性を持たせなかつたためである。

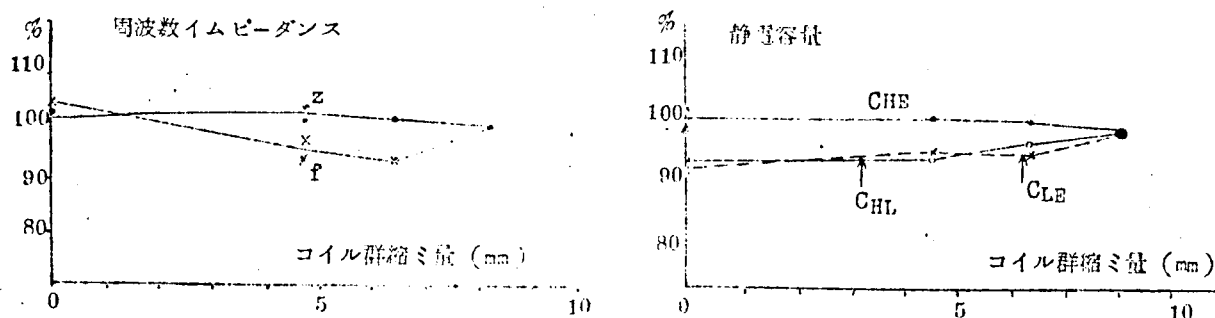
短絡試験前後に実測したほかに、変圧器組立途中に人工的にコイル配置をズラせて、漏洩インピーダンス、静電容量、共振周波数の測定を行なった。結果は第 4.3-5 図の示すとおりである。



第 4.3-5 図 垂直方向にコイルが移動した時の検出能力

最初正規組立を行ない、上部タンクウェッジを抜き取つてコイル群をいつたん降りきるところまで下げ（約 30 mm）、高圧コイルはそのまゝにして置き、低圧コイルを # 1, # 2 と # 7, # 8 を交互に 5 mm づつ移動させて測定した。静電容量は高圧-鉄心間 ( $C_{HE}$ )、低圧-鉄心間 ( $C_{LE}$ )、高圧-低圧間 ( $C_{HL}$ ) を測つた。この場合、変圧器コイルと鉄心との関係は実測の場合とは異り鉄心内は変化無く、コイルエンド部の相対関係が変化しているのであるが、やはり  $C_{HE}$  が最も鋭敏に変化している。コイル位置 18 mm の変化に対して約 4 % の相対変化率である。

主方向（コイル締付方向）にコイルが偏位した場合の検出能力に関しては、やはり変圧器組立途中に主方向締付荷重を変えて  $Z, f, C$  の測定を行なつた。（第 4.3 - 6 図参照）。



第 4.3 - 6 図 主方向に間隔が変化した場合の検出能力

締付荷重を変えると、コイル間、コイル鉄心間の絶縁物寸法が小さくなり、漏洩インダクタンスは小さくなり、 $C_{LE}, C_{HL}$  は増加する事が考えられるが、実測結果もそのように現れている。

$$\text{絶縁物寸法} = \text{鉄心マド寸法} - \text{コイルの厚さ} = 230 - 81.6 = 148.4$$

$$\text{絶縁物の圧縮率} = \frac{\text{ちぢみ量}}{\text{絶縁物寸法}} = \frac{8}{148.4} = 5.4\%$$

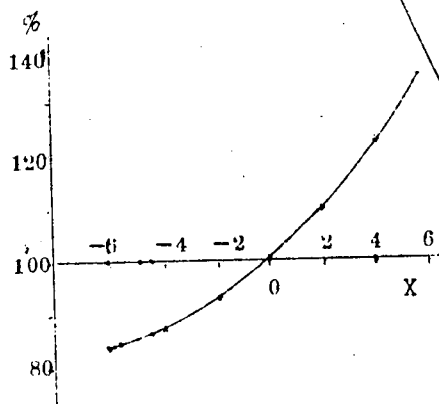
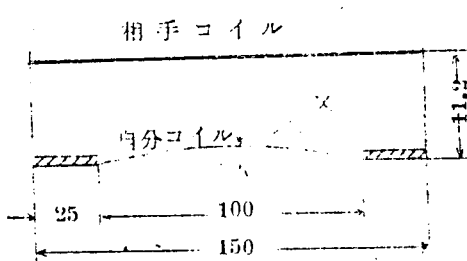
であり、一方  $C_{LE}, C_{HL}$  の変化率は 6 % で完全な一致を見る。

以上のようにコイルの垂直方向の移動に対しては  $C_{HE}$ 、主方向の移動には  $C_{LE}, C_{HE}$  が最も敏感なことが判明したが、測定原理のうえから見た場合にも現在の方法のなかでは容量が最も精度が良い。なぜならば、シエーリングブリッジはその名の示すとおりブリッジ法であるために、安定度、有効桁数のうえでも秀れている。イムピーダンスの測定は、今回のように電圧、電流計法による場合には、0.5 級の指示計を使用して 2 % 程度の差を発見するためには、よほどよく管理された計器を使用しないかぎり不可能である。短絡試験後の分解点検の結果では、これが実用の変圧器であつたら、このまゝ永久に使用可能であるとは判断しかねる程度の損傷を受けていたから、イムピーダンスを良否の判断に使用するためには、電圧電流計法とはべつのブリッジ法を開発する必要がある。周波数による検出感度はイムピーダンス程度はあるのであ

るが、今回もちいた方法は共振点を検出する電圧計に周波数の選択性をもたせなかつたので、検出精度が甘かつたと反省される。周波数は電子管式カウンターで測定しているので、4桁まで有効数字が取れるのであるから、同調点検出感度が上昇し、高次の同調点まで検出可能となれば、コイルの個々の動きも検出される可能性を持つであろうと期待される。

模擬試験では主方向のコイル移動はコイル全体の縮付力を変えてコイル間距離を変化させたのであるが、実用の変圧器では、短絡によってこのような現象が起るとは考えにくい。なぜなら、コイル間隔はワッシャおよびカルタによつて保たれているものであるから、1台のトランス内で、プレスボードの機械的な性質が局部的に余程異なつたものが混つていないかぎり、主方向のコイル相互距離は変ることはいらず、また巻合厚さは鉄心窓枠寸法で決定されていて不変である。しかし、短絡試験結果判明したように、カルタピッチ間の導体が永久歪を生じ、そのためにコイル間距離が実効的に変化することは設計が不適当な場合は起りうる現象である。短絡試験時には時間節約のために  $C_{HE}$  しか測定していなかつたので、コイル導体の彎曲によつて  $C_{HL}$ ,  $C_{LE}$  がどのような影響を受けたか情報をえられなかつたので、抵抗紙で推定を行なつた。

カルタ形状は矩形ではなく梯形であるので、カルタ間スパンは一定ではないが、1例として100の場合について解いた。



第4.3.-7図 素線彎曲による容量変化

コイル素線の彎曲はカルタ端をとおり、

スパン中央において  $\pm 8, \pm 4, \pm 2$  の点を通る円弧であると仮定した。容量の変化率はわりあい大きく、今回のモデル変圧器の#6コイルのように6mmも凹んだ場合には、15%程度の変化を生ずる。しかし変圧器全体について考えると、高低圧コイルが向き合う面の荷重が最も大きく、まずい設計を行なつてもコイル素線の彎曲はこの2枚だけに発生する程度であると考えられるし、また一枚のコイル内では、コイルエンド部のほうが鉄心内よりも電磁力が小さいので変歪は小さく、変圧器全体の  $C_{HL}$  を測定した場合には変化量は5~10%であつたろうと推定される。

今回の短絡試験には現れなかつたがコイルエンド部が垂直方向電磁力に耐える事が出来ず、矩形コイルがダ円コイルになる場合も起り得るが、この場合には  $C_{HE}$ ,  $C_{LE}$ ,  $C_{HL}$  およびイムピーダンスにきわめて大きな変化が生じるであろう。

## 4.3.2. 故障検出法の検討

変圧器の故障は4.2.4.コイルの運動, 4.3.1.モデル変圧器による実験の所で説明したように一定の形にはまつたコイルの移動, 変歪をともなって進展してくるものである。そこでモデル変圧器の実験でこころみた, イムピーダンス, 容量の変化だけを測定していても或程度の故障検出が可能である。

- 1) カルタスパン間の導体が短絡時に発生する応力に耐えられなくなつて, 永久歪を生じコイル間隔が実効的に変つた場合。

電磁力の推定は精度よく行なえることは第3章で詳論した。またカルタスパン間の応力は, 第6章にモデルコイルを使って実測した結果を示すが, 応力分布の状態が明確になり, また銅線の動的荷重に対する残留歪の値も定量的に研究されたので, 設計段階でこのような現象の生じることを未然に防ぐことができるようになり, 適当な設計のもとに製作された変圧器では考慮する必要がない。万一カルタスパン間に変歪を生じると, 高圧, 低圧の群間に面したコイルに一番大きく発生しそのために容量変化は $C_{HL}$ に最も大きく現れるがその量はわりあい小さく, 短絡試験を行ったコイル程度の変歪(4.4に記述する)で, 5~10%程度であろうと推定される。 $C_{HE}, C_{LE}$ にはほとんど影響を受けない。リアクタンスの変化も少いであろう。

- 2) 鉄心内のコイルが垂直方向にずれた場合。コイルエンドではタンクウェッジが効いているのでズレは少ない。またずれるときは高圧, 低圧群はそれぞれ1体となって動く。

内部組立の際にホール素子を使用して磁気中心を合せておけば, このような故障の発生するチャンスは少なくなるであろうが, 絶滅は期しにくい。とくにこのような故障は, なにかの誘因でコイルが一寸移動すれば悪化の方向にむくので, おこりやすい現象である。この場合には, 移動したコイル群の対鉄心容量の増加が最も顕著に認められる。イムピーダンスの増加は割合小さい。コイルは高圧, 低圧, それぞれの群内では集る方向に力が働き, 同一群内コイル間では垂直方向に動くときには摩擦力が働いてバラバラには動きにくいものであるが, 実験の結果をみても矢張り群間に面したコイルのほうが移動量大きい。これらの一般的傾向を過去の実績をもとにして考にいれ, コイルの垂直方向移動にともなりリアクタンス, 静電容量の変化を予測計算しておけば, 故障の程度を推測可能であろう。

- 3) コイルエンド部が大きく湾曲する。

第6章でコイルの機械的性質が明らかにされているが, これらのデーターをもとにして設計されたコイルはどの程度の安全率をもつものであるか予測できるであろう。またこの故障の場合には該当コイル群の対鉄心容量は減少し, リアクタンスは増加するであろうからほかの故障と区別できる。

変圧器の故障としては以上の3件がもつとも代表的な現象であるから、過去の実績、設計時における安全率のとりかたをもとにし故障時におけるコイルの移動、変歪を仮定してその条件のもとにおけるインダクタンス、静電容量の変化の具合をあらかじめ計算しておけば逆に、インダクタンス、静電容量の変化から大略の故障状況を推定することができる。しかしさらに詳細かつ適確な推定を行なわんとするときには、リアクタンス、静電容量以外の量によって探ることを研究する必要がある。なぜならば二巻線変圧器について考えてみると、情報量としてリアクタンス1、静電容量3、しかえられないのであるから、コイル群内の現象までを推定することは根本的に無理な注文である。また前述の3つの故障がいりくんで生じた場合にも、これだけの情報量で解釈することは無理である。

そこでより多くの情報量を得ることの出来る手段が望まれるわけであるが、たとえば衝撃電圧波形、高次までの共振周波数の測定結果と、コイル1枚1枚の配置との間の関係づけがえられれば、コイル群内のコイルの移動、変歪、多重故障にもメスをいれることができるようになり、故障診断精度は上昇するものと考えられる。次項で述べる電子計算機によるリアクタンス、静電容量の計算方法の開発はかかる目的のもとに研究を始めたものの一端であつて、モデル変圧器で実施したリアクタンス、静電容量法による故障検出にも利用できる方法であることは論をまたない。

#### 4.3.3. 漏洩リアクタンスの計算法

従来用いられている漏洩リアクタンスを求める理論式は、磁力線の軌跡を計算しやすいように簡略化し、かつ外鉄形変圧器のように多数枚のコイルとコイル間絶縁物より構成されるコイル群を、高圧、低圧コイル群外形寸法内に、一様にATが分布しているとして解かれているものが多い。

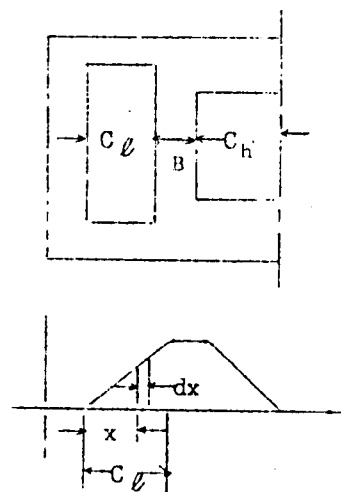
##### 1. コイルが対称配置の場合

コイル内起電力は

$$de_c = \frac{4.44 B \times N f M_t x dx}{10^5 C} = \frac{2 N^2 f M_t i x^2 dx}{25.4 C^2 \alpha}$$

積分して

$$e_o = \frac{2 M_t}{25.4 \alpha} \cdot \frac{C}{3} \cdot \frac{f i N^2}{10^7}$$



第4.3-8 図

群間については

$$\sigma_B = \frac{2Mt}{25.4\alpha} \cdot B \cdot \frac{fiN^2}{10^7}$$

よつて

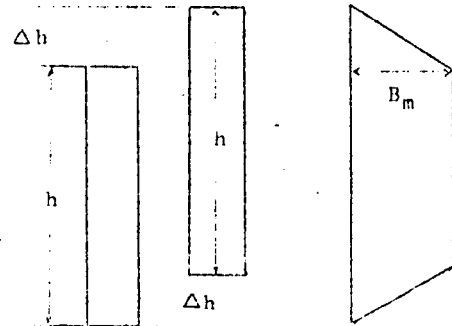
$$\%IX = \frac{fiN^2}{h_{HL}E} (10^{-5}) \frac{2Mta}{25.4\alpha} \left\{ \frac{C_\ell}{3} + B + \frac{C_h}{3} \right\} = Z \left\{ \frac{C_\ell + C_h}{3} + B \right\} \dots\dots\dots (4.3-1)$$

## 2. 非対称配置の場合

右図のように等しいコイル長さのものが $\Delta h$ ズレ

ているときには

$$\begin{aligned} \%IX_z &= \frac{fiN^2}{h_{HL}E} \frac{\Delta h^2}{h^2} (10^{-5}) \\ &\cdot \frac{2Mta}{25.4\alpha} \left\{ \frac{\Delta h}{3} + h - \Delta h + \frac{\Delta h}{3} \right\} \\ &= Z \frac{\Delta h^2}{h^2} \frac{a}{\alpha} \left[ h - \frac{\Delta h}{3} \right] \dots\dots\dots (4.3-2) \end{aligned}$$



第 4.3-9 図

上記のような古典的な取り扱い方は、主方向の群間距離の変動に対しては割合良好な結果をあたえるが、垂直方向のズレに対してはあまり正確ではないし、コイル群内の個々のコイルの動きを対象に考えることは不可能である。

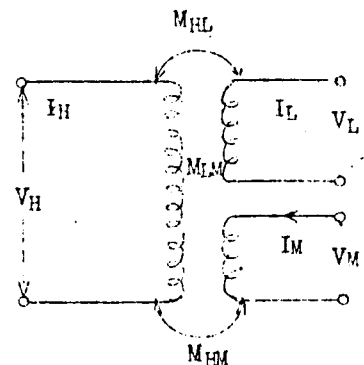
近年急速に発達してきた電子計算機を利用すればいかなるコイル配置のものであつても正確に計算可能である。以下において計算機を用いて計算する方法について述べることにする。

## 3. 電子計算機を用いて漏洩リアクタンスを計算する方法

一般的な場合を考えて変圧器は、

高圧(H)、低圧(L)、三次(M)、

の三巻線よりなるものとし、H、L、Mを巻線のサフィクスとして以下に使用する。電圧をV、電流をI、インダクタンスをMとすると、右図の回路では次式が成立する。



第 4.3-10 図 三巻線変圧器

$$\begin{pmatrix} \dot{V}_H \\ \dot{V}_L \\ \dot{V}_M \end{pmatrix} = j\omega \begin{pmatrix} M_{HH} & M_{HL} & M_{HM} \\ M_{LH} & M_{LL} & M_{LM} \\ M_{MH} & M_{ML} & M_{MM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_H \\ \dot{I}_L \\ \dot{I}_M \end{pmatrix} \dots\dots\dots (4.3-3)$$

巻数を $N_H, N_L, N_M$ として上式を正規化すると

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_H \\ \dot{V}_L \\ \dot{V}_M \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} M'_{HH} & M'_{HL} & M'_{HM} \\ M'_{LH} & M'_{LL} & M'_{LM} \\ M'_{MH} & M'_{ML} & M'_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}'_H \\ \dot{I}'_L \\ \dot{I}'_M \end{bmatrix}$$

ここに

$$\begin{cases} M'_{ij} = M_{ij} / (N_i, N_j) \\ \dot{V}'_i = \dot{V}_i / N_i \\ \dot{I}'_i = \dot{I}_i \cdot N_i \end{cases} \quad (i, j = H, L, M)$$

今規準 KVA を次のように仮定する

容量 :  $K_0$  (KVA)

電圧 :  $V_0$  (V)

電流 :  $I_0$  (A)

巻数 :  $N_0$

規準 KVA についての百分率リアクタンス降下  $\%IX$  は次式で与えられる。

$$\%IX_{HL} = \frac{\omega \cdot (M'_{HH} - 2M'_{HL} + M'_{LL}) \cdot N_0^2 \cdot I_0}{V_0} \cdot 100 \quad (\%)$$

$$= \omega \cdot (M'_{HH} - 2M'_{HL} + M'_{LL}) \cdot \left(\frac{N_0}{V_0}\right)^2 \cdot (V_0 \cdot I_0) \cdot 100 \quad (\%)$$

$$= \omega \cdot (M'_{HH} - 2M'_{HL} + M'_{LL}) \cdot \left(\frac{N_H}{V_H}\right)^2 \cdot (K_0 \cdot 1000) \cdot 100 \quad (\%)$$

$$\because N_0/V_0 = N_H/V_H \quad \text{であるから}$$

..... (4.3-4)

同様にして

$$\%IX_{HM} = \omega \cdot (M'_{HH} - 2M'_{HM} + M'_{MM}) \cdot \left(\frac{N_H}{V_H}\right)^2 \cdot (K_0 \cdot 1000) \cdot 100 \quad (\%)$$

$$\%IX_{LM} = \omega \cdot (M'_{LL} - 2M'_{LM} + M'_{MM}) \cdot \left(\frac{N_H}{V_H}\right)^2 \cdot (K_0 \cdot 1000) \cdot 100 \quad (\%)$$

以上に示すように、 $M_{ij}$  を求めることができれば、規準 KVA あたりの漏洩リアクタンスは簡単に求めることができる。ところが実物変圧器のコイルは多数枚のコイルによって構成されているので、上記の  $M_{HH}, M_{HL}, M_{LL}, M_{HM}, \dots$  などは 1 枚 1 枚のコイルの相互インダクタンスの合成として与えられるものである。

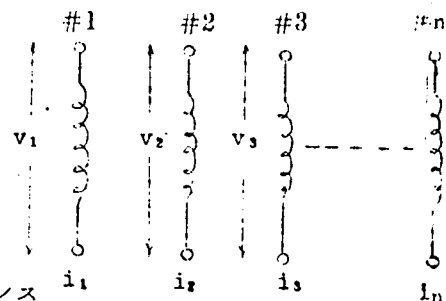
右図のように  $n$  個のコイルがあつて

$v_1, v_2, \dots, v_n$  : コイルの両端の電位差

$i_1, i_2, \dots, i_n$  : コイル内を流れる電流

$G_{ij}$  : コイル  $i-j$  間の相互インダクタンス

$i=j$  のときは自己インダクタンス



第 4.3-11 図

とすると

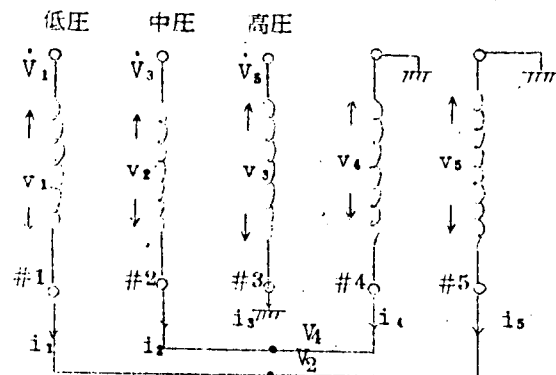
$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} = j\omega \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} & \dots & G_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1} & G_{n2} & \dots & G_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{pmatrix} \dots\dots\dots (4.3-5)$$

第 4.3-11 図は 1 枚 1 枚のコイルが独立している場合であるが実物の変圧器ではたがいに内部結線が行なわれている。たとえば下図のようである。

各コイルが結ばれている点および各群（高・中、低圧）の始点を Node として，上図のように番号をつける。各群の終点は接地と考え，この点を基準電位と考えるので Node 番号はつけない。

Node 電圧を  $V_1, V_2, \dots, V_5$

Node 電流を  $I_1, I_2, \dots, I_5$



第 4.3-12 図 T マトリックス説明図

とすると，先に求めた  $v_1, v_2, \dots, v_5$   $i_1, i_2, \dots, i_5$  との間には，キルヒホッフの定理をもちいて次の関係式が成立する。

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{V}_3 \\ \dot{V}_4 \\ \dot{V}_5 \end{pmatrix} = (T) \begin{pmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{V}_3 \\ \dot{V}_4 \\ \dot{V}_5 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (4.3-6)$$

電流に関しては

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \\ \dot{I}_4 \\ \dot{I}_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{pmatrix} = (T)_T \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (4.3-7)$$

$(T)_T$  は  $(T)$  の転置行列である。



一般的な表現を用いれば

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} = (T) \begin{pmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \vdots \\ \dot{V}_k \end{pmatrix} \quad \text{および} \quad \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_k \end{pmatrix} = (T)_T \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (4.3-8)$$

ただし node の数  $k \leq n$  である。

しかるに (4.3-5) 式より

$$j\omega \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11} & \dots & G_{n1} \\ \vdots & & \vdots \\ G_{n1} & \dots & G_{nn} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} = (G)^{-1} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix}$$

この式に (4.3-8) 式の関係代入すると

$$j\omega \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_k \end{pmatrix} = (T)_T (G)^{-1} (T) \begin{pmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \vdots \\ \dot{V}_k \end{pmatrix}$$

$$\therefore \begin{pmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \vdots \\ \dot{V}_k \end{pmatrix} = j\omega ((T)_T (G)^{-1} (T))^{-1} \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_k \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (4.3-9)$$

$k$  個の nodal point における電圧電流の関係式が求まったが、さらに高圧、低圧、中圧の 3 つに大別するためには、変換行列  $T'$  を使って  $\dot{V}_H, \dot{V}_M, \dot{V}_L, \dot{I}_H, \dot{I}_M, \dot{I}_L$  を  $\dot{V}_1, \dots, \dot{V}_k, \dot{I}_1, \dots, \dot{I}_k$  より求めればよい。

$$\begin{pmatrix} \dot{V}_H \\ \dot{V}_L \\ \dot{V}_M \end{pmatrix} = (T') \begin{pmatrix} \dot{V}_1 \\ \vdots \\ \dot{V}_k \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_k \end{pmatrix} = (T')_T \begin{pmatrix} \dot{I}_H \\ \dot{I}_L \\ \dot{I}_M \end{pmatrix}$$

この式を使って (4.3-9) 式を書き直すと

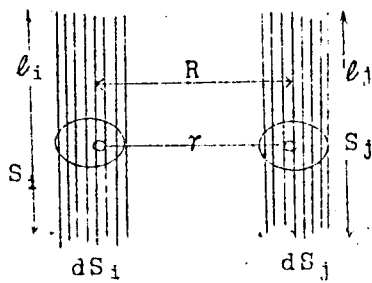
$$\begin{pmatrix} \dot{V}_H \\ \dot{V}_L \\ \dot{V}_M \end{pmatrix} = j\omega (T') ((T)_T (G)^{-1} (T))^{-1} (T')_T \begin{pmatrix} \dot{I}_H \\ \dot{I}_L \\ \dot{I}_M \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (4.3-10)$$

(4.3-10) 式と (4.3-3) 式はまったく同じ形であるから 2 枚のコイルの相互インダクタンスを素子とする, インダクタンスマトリックス(G) が求まれば, コイルのつながぎを意味する変換マトリックス(T), (T'), と組合せて百分率リアクタンスが求められる。

変圧器は鉄心内, コイルエンドとも四周に導磁率の高い物体が存在するので, G マトリックスを作るときにはこれらの影響は IMAGE を作つて計算すれば良い。これらのことに関しては第 7 章 電子計算機による検討の項で詳論する。

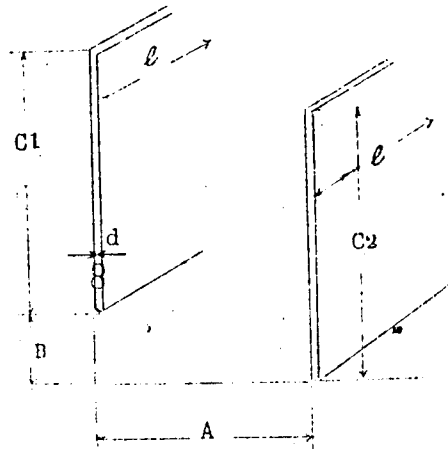
### 2 枚の電流板間の相互インダクタンス

コイル 1 枚は多数のターンよりなり, 変圧器はたがいに多数枚のコイルから構成されるので, 1 本 1 本の素線の自己, 相互インダクタンスから計算させることは, 7090 のような大形高速電子計算機でも不可能であるので, コイルを電流板と考え, 2 枚の間の相互インダクタンスを求める理論式を求める。このときコイルの厚みはきわめて薄く厚み方向には磁束密度には差は生じないと仮定する。



第 4.3-13 図 GMD 説明図

GMD の概念



第 4.3-14 図 2 枚のコイルの位置関係

導線 1 と導線 j との間の相互インダクタンスは 各流線電流の間の相互インダクタンスの合成であると考えて

$$G_{ij} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{S_1 \cdot S_j} \int dS_1 \int dS_j \oint_1 \oint_j \frac{(d\ell_1 d\ell_j)}{r} \dots \dots \dots (4.3-11)$$

として表される。但し, 流系の周囲物質は, 導体をも含めて全部誘磁率が  $\mu_0$  であると仮定する。しかるに 2 本の流系  $dS_1$  と  $dS_j$  との間の相互インダクタンスは

$$dG_{1j} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_1 \oint_j \frac{(d\ell_1 d\ell_j)}{r} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} (\log \frac{2l}{r} - 1) \dots \dots (4.3-12)$$

ここに  $r$  は  $dS_1$  と  $dS_j$  との間の距離である。そしてこの  $r$  は各流系によつて変化するものであることを考慮にいれて, (4.3-12) 式を (4.3-11) 式に代入すると

$$G_{ij} = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left\{ \log 2\ell - \frac{1}{S_i S_j} \iint \log r \cdot dS_i dS_j - 1 \right\}$$

となる。しかるに今回考えるのは板電流であつて、板厚はきわめて薄いものであるから、  
G.M.D.は

$$\begin{aligned} \log R &= \frac{1}{S_i S_j} \iint \log r \cdot dS_i dS_j = \frac{1}{C1 \cdot C2 \cdot d^2} \int_B^{B+C1} \int_0^{C2} \int_0^d \int_A^{A+d} \\ \log r \cdot dy_1 dx_1 dv_2 dx_2 &= \frac{1}{C1 \cdot C2} \int_B^{B+C1} \int_0^{C2} \log \sqrt{A^2 + (y_1 - y_2)^2} dy_1 dy_2 \\ &= \frac{1}{2C1 \cdot C2} \int_B^{B+C1} \int_0^{C2} \log (A^2 + (y_1 + y_2)^2) dy_1 dy_2 \dots\dots\dots (4.3-13) \end{aligned}$$

$y_1$ に関する積分を最初に計算する。答えをY1とすると

$$\text{つぎのように変換して} \begin{cases} y = y_1 - y_2 & dy = dy_1 \\ y_1 = C2 & y = C2 - y_2 \\ y_1 = 0 & y = -y_2 \end{cases}$$

$$\int_0^{C2} \log (A^2 + (y_1 + y_2)^2) dy_1 = \int_{y_2}^{C2-y_2} \log (A^2 + y^2) dy$$

$$= \left[ y \log (y^2 + A^2) - 2y + 2A^2 \frac{1}{A} \tan^{-1} \frac{y}{A} \right]_{-y_2}^{C2-y_2}$$

$$Y1 = (C2 - y_2) \log((C2 - y_2)^2 + A^2) - 2(C2 - y_2) + 2A \tan^{-1} \frac{C2 - y_2}{A}$$

$$- \left[ -y_2 \log(y_2^2 + A^2) + 2y_2 + 2A \tan^{-1} \frac{-y_2}{A} \right] \dots\dots\dots (4.3-14)$$

$y_2$ に関する積分をつぎにおこなう。

Y1の第一行目の積分

$$\int_B^{B+C1} \left[ (C2 - y_2) \log((C2 - y_2)^2 + A^2) - 2(C2 - y_2) + 2A \tan^{-1} \frac{C2 - y_2}{A} \right] dy_2$$

$$\begin{cases} C2 - y_2 = y & \text{とおくと} & dy_2 = -dy \\ y_2 = B & \rightarrow & y = C2 - B \\ y_2 = B + C1 & \rightarrow & y = C2 - B - C1 \end{cases}$$

$$= - \int_{C2-B}^{C2-B-C1} (y \log (y^2 + A^2) - 2y + 2A \tan^{-1} \frac{y}{A}) dy$$

$$\left[ \begin{array}{l} \frac{y}{A} = Z \quad \text{とおくと} \quad dy = A dZ \\ \int \tan^{-1} \frac{y}{A} dy = A \int \tan^{-1} Z dZ \end{array} \right.$$

$$= - \left[ \frac{1}{2} (y^2 + A^2) \log (y^2 + A^2) - \frac{y^2}{2} - \frac{2y^2}{2} + 2A \cdot A \left[ \frac{y}{A} \tan^{-1} \frac{y}{A} - \frac{1}{2} \log \left( 1 + \left( \frac{y}{A} \right)^2 \right) \right] \right]_{C2-B}^{C2-B-C1}$$

$$= - \left[ \frac{1}{2} (y^2 + A^2) \log (y^2 + A^2) - \frac{3}{2} y^2 + 2Ay \tan^{-1} \frac{y}{A} - A^2 \log \left( \frac{A^2 + y^2}{A^2} \right) \right]_{C2-B}^{C2-B-C1}$$

.....(4.3-15)

Y1 の第 2 行目の積分

$$= \int_B^{B+C1} \left[ -y \log (y^2 + A^2) + 2y + 2A \tan^{-1} \frac{-y}{A} \right] dy$$

$$= \int_B^{B+C1} \left[ y \log (y^2 + A^2) - 2y + 2A \tan^{-1} \frac{y}{A} \right] dy$$

$$= \left[ \frac{1}{2} (y^2 + A^2) \log (y^2 + A^2) - \frac{3}{2} y^2 + 2Ay \tan^{-1} \frac{y}{A} - A^2 \log \left( \frac{A^2 + y^2}{A^2} \right) \right]_B^{B+C1}$$

.....(4.3-16)

したがって電子計算機で使用する習慣にしたがった FUNCTION を使用し,

$$\text{MUTALF}(A, y) = \left[ \frac{1}{2} (y^2 + A^2) \log (y^2 + A^2) - \frac{3}{2} y^2 + 2Ay \tan^{-1} \frac{y}{A} - A^2 \log \left( \frac{A^2 + y^2}{A^2} \right) \right]$$

.....(4.3-17)

とすると

$$\log R = - \text{MUTALF}(A, C2-B-C1) + \text{MUTALF}(A, C2-B)$$

$$+ \text{MUTALF}(A, B+C1) - \text{MUTALF}(A, B) \dots\dots\dots (4.3-18)$$

$$\therefore G_{1j} = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \{ \log 2\ell - \log R - 1 \} \dots\dots\dots (4.3-19)$$

● 自己インダクタンスを求める場合には (4.3-18) 式において

$A=0, B=0, C1=C2=C$  であるが, 一方 Maxwell によつて辺の長さが  $C$  および  $d$  である矩形面積の  $G, M, D$  は

$$\log R = \frac{1}{2} \log (C^2 + d^2) - \frac{\ell^2}{12 C^2} \log \left(1 + \frac{d^2}{C^2}\right) - \frac{C^2}{12 \ell^2} \log \left(1 + \frac{d^2}{C^2}\right) \\ + \frac{2}{3} \frac{\ell}{C} \tan^{-1} \frac{C}{d} + \frac{2}{3} \frac{C}{d} \tan^{-1} \frac{d}{C} - \frac{25}{12} \dots \dots \dots (4.3-20)$$

として与えており、もしも  $C \gg d$  なるときは

$$\log R \div \log 0.2235 (c+d), \quad \log (1/0.2235) = 1.500 \text{ であるから}$$

$$L = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left( \log \frac{2\ell}{c+d} + \frac{1}{2} \right) \dots \dots \dots (4.3-21)$$

で与えられる

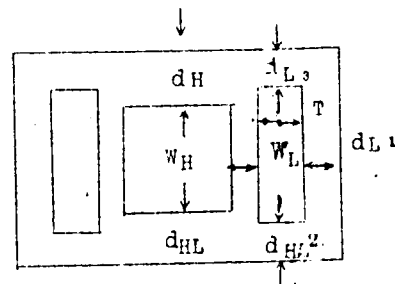
以上の式の誘導より明かなように、いかに複雑なコイル配置でも漏洩リアクタンスは求めうる。したがってコイルが移動したのちのリアクタンスの変化も移動量がわかれば簡単に求めることができる。

### 4.3.3. 静電容量の計算法

静電容量の計算法は過去いろいろの方法がこことみられているが、実用上有効な手法はまだ確立されていないようである。とくにコイルのわずかな量の移動によつて発生する容量の変化を適確に計算することはきわめて困難なことである。以下において現在までにもちいられている方法を批判し、目下開発中の手法について述べる。

#### 1. 簡略法

最も簡単な計算の方法としては平行板電極間容量の計算式を利用する方法である。ただし極板間の距離が対向面積に比してきわめて小さく端の電界の乱れが無視できるとしている。右図において奥行1Mあたりについて考



第4.3-15図 静電容量

$$C_{LE} = \frac{W_L}{\epsilon_1 d_{L1}} + \frac{T}{\epsilon_2 d_{L2}} + \frac{T}{\epsilon_3 d_{L3}} \dots \dots \dots (4.3-22) \\ C_{HL} = \frac{(W_H + W_L)}{\epsilon d_{HL} \cdot 2}$$

但し  $\epsilon, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  : 誘電率  
 $T$  : 低圧群の最大厚み寸法  
 $W_L, W_H$  : 低圧、高圧コイル巾

変圧器として考える場合には，奥行き方向としてコイル平均長を乗ずればよい。

この手法は計算方法がきわめて簡単であるためにしばしば利用される式であるが，厳密に考える場合には理論的根拠にとぼしく，精度もよくない。また，低圧，高圧群内の1枚1枚のコイルについて検討することは不可能である。

## 2. Subarea 法

この方法は，Daniel. K. Reitan, Thomas. J. Higgins 両氏によつて紹介された手法で，導体，周囲鉄心を Subarea に分割し，各 area を線電荷と考えて電位係数を求め，キャパシタンスを計算する方法である。ただしこの場合つぎの3つの仮定をたてゝいる。

- (1) もし各線電荷が元来それが構成している一個の導体と同電位に保たれているならば，単位長あたりの導体上の電荷は相当する単位長あたりの線電荷の合計に等しい。
- (2) ほかの Subarea 上の電荷によるある Subarea の中心の電位を求めるとき，ほかの sub-area 上の電荷は一点に集中した線電荷と考えてよい。
- (3) 自分自身の subarea の上の電荷による subarea の中心の電位を求めるときは，電荷は一様に分布しているとする。

以上の仮定によつて，各 subarea の中心電位  $V_i$  は各電荷の一次結合で表わすことができる。  
すなわち

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & S_{N2} & \cdots & S_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_N \end{pmatrix} \quad (4.3-23)$$

こゝに  $S_{ij}$  は電位係数であつて電位の基準点までの距離を  $M$  とすると， $j$  点にある Subarea の電荷  $Q_j$  によつて subarea  $i$  点に誘起される電位  $V_i$  との間には，つぎの関係式が成立する。

$$V_{i(j)} = \frac{Q_j}{2\pi\epsilon} \log \frac{M}{D_{ij}} \quad (4.3-24)$$

$D$  は  $i, j$  間距離

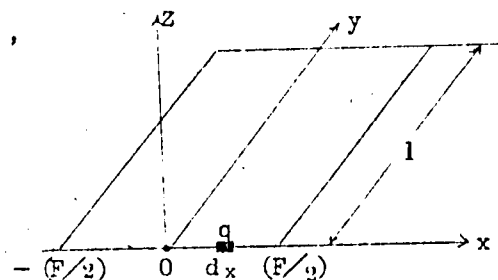
$i = j$  の場合は大きさを考へ，(3)の仮定をもちいる。

右図において， $q$  なる電荷による0点の電荷は，

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon} \frac{1}{x} q$$

∴ 電位  $dV$  は

$$dV = \int_M^{-x} -E dx = \frac{q}{2\pi\epsilon} \log \frac{M}{x}$$



第4.3-16図 矩形板の静電容量

従つて全電荷による0点の電位 $V$ は

$$V=2 \int_0^{F/2} dV dx = 2 \frac{q}{2\pi\epsilon} \int_0^{F/2} \log \frac{M}{x} dx = \frac{Fq}{2\pi\epsilon} \left[ \log M - \log \frac{F}{2} + 1 \right] \dots\dots\dots (4.3-25)$$

(4.3-23) 式を $Q$ について解けば、(4.3-26) のようになる。

$$\begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1N} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2N} \\ \vdots & \vdots & C_{ij} & \vdots \\ C_{N1} & C_{N2} & \dots & C_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{pmatrix} \dots\dots\dots (4.3-26)$$

$C_{ij}$  ..... 容量係数

$C_{ij} = C_{ji}$  ..... 静電容量係数といわれる

(4.3-26) 式を書きなおすと

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= K_{11}V_1 + K_{21}(V_1 - V_2) + \dots\dots\dots + K_{N1}(V_1 - V_N) \\ Q_2 &= K_{12}(V_1 - V_2) + K_{22}V_2 + \dots\dots\dots + K_{N2}(V_2 - V_N) \\ &\dots\dots\dots \\ Q_N &= K_{1N}(V_N - V_1) + K_{2N}(V_N - V_2) \dots\dots + K_{NN}V_N \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.3-27)$$

但し  $K_{11} = C(1,1) + C(2,1) + \dots\dots + C(N,1)$

$K_{21} = -C(2,1), \quad K_{31} = -C(3,1)$

一般的表示では

$$K_{ii} = \sum_{j=1}^N C(j,i) \quad \text{自己容量}$$

$$K_{ij} = -C(i,j) \quad \text{相互容量}$$

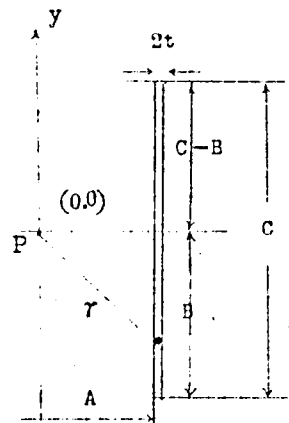
以上の演算を行なえば、いかなる形状のものでも静電容量を求めうるが、人間の手計算では不可能であつて電子計算機の利用にまたねばならない。三相バスダクトについて利用し、三瀬一括とハウジングとの間の容量を計算したところ、40%程度夾側値よりも小さい値であつた。この手法は、一つの導体を多数の Subarea に細分することによつて、電荷の分布が一様でないとしているところはすぐれた手法であるが、(4.3-24) 式は厳密性に欠けている。着目している2つの Subarea を大きさの無い線と考える点には、2つの Subarea が遠く離れている場合には誤差は少ない。2つの Subarea の中心距離が Subarea の巾より大きい場合にはよい近似をえることは、3.3.2 導体の表現法による誤差 のところで論じたとおりである。しかし同時に残りの Subarea をすべて面積の無い線と考えるのは相当無理である。

導体は電界を考える場合には、 $\epsilon = \infty$ と仮定したときにまったく同じ電界をうるわけであるから、大きさのある電極の問題をSubarea法で解く場合、(4.3-24)式を用い、常に $\epsilon = \text{Const}$ として解くのは誤りを犯していることになる。すなわち、この方法はほかの導体による遮蔽効果を見逃している。さらにこの方法の欠点は、Subareaに分割する数が非常に多く、たとえばコイル板数50枚程度の変圧器について解くことは高速大形計算機を用いても不可能である。

### 3. 積分法

変圧器のようにコイル枚数の多いものにはSubarea法を利用することは計算時間の点より不可能であるので、一枚のコイル内では電荷分布は一様であるという仮定を立て、積分可能として計算時間を縮める方法がある。

右図のように諸寸法を定め、板厚に比して十分遠い一点における電位を求め。板電荷の分布はいちようとし、単位深さ、単位高さあたりの電荷を $q$ とすると、P点における電位 $V$ は次式で与えられる。ただし基準点電位を適當に選ぶことにより、基準よりの電位は、関却できるとする。



第4.3-17図 板電荷による電位

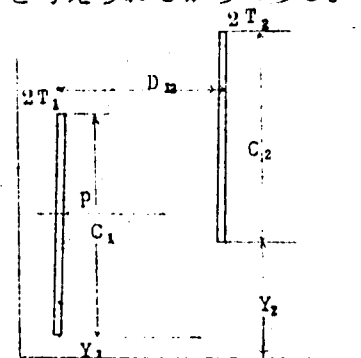
$$V = \frac{-1}{2\pi\epsilon_0} \int q \log r dy$$

$$= \frac{-q}{2\pi\epsilon_0} \int_{-B}^{C-B} \log(A^2 + y^2)^{\frac{1}{2}} dy$$

$$= \frac{-q}{4\pi\epsilon_0} \left[ y \log(y^2 + A^2) - 2y + 2A \tan^{-1} \frac{y}{A} \right]_{-B}^{C-B} \dots \dots \dots (4.3-28)$$

導電板に $Q$ なる電荷を与えたとき導体板の電位 $V_0$ はP点を板電荷の表面( $A = t$ )、板巾の中央位置( $B = \frac{C}{2}$ )における電位を考えれば良い。なんとなれば一般に板厚( $2t$ )は板巾( $C$ )に比べて十分小さく、(4.3-28)式で与えられる等電位線はほとんど導体表面にそい、断面が楕円となるが、これを矩形の板断面と考へても大差がないと考へられるからである。

2枚の電荷板間の電位係数、容量係数は物理的条件を右図のように定め、自分の番号を1、相手を2とし、自分の電位を考へるときは板巾中央、板平面を考へると自分の電荷による電位は $A = T_1$ であつて



第4.3-18図  
2枚の間の容量



$$V_{P1} = \frac{-Q_1}{C_1 4\pi\epsilon_0} \left[ y \log(y^2 + A^2) - 2y + 2A \tan^{-1} \frac{y}{A} \right] \frac{y_1 + C_1 - (\frac{C_1}{2} + y_1)}{y_1 - (\frac{C_1}{2} + y_1)} \dots\dots\dots (4.3-29)$$

相手の電荷による電位は  $A = D_{12}$  であつて

$$V_{P2} = \frac{-Q_2}{C_2 2\pi\epsilon_0} \left[ y \log(y^2 + A^2) - 2y + 2A \tan^{-1} \frac{y}{A} \right] \frac{y_2 + C_2 - (\frac{C_2}{2} + y_1)}{y_2 - (\frac{C_2}{2} + y_1)} \dots\dots\dots (4.3-30)$$

観察点 P を相手側に移して同様に計算し，あとは Subarea 法で行なつたと同じ手続をふめば，コイル 1 枚を一電極と考えた場合の容量を求めることができる。鉄心の影響は IMAGE をとることによつて解決できる。このようにすれば計算時間は非常に節約でき，50 枚のコイルを持つ変圧器についても計算可能であるが，Subarea 法におけると同様，ほかの導体による遮蔽効果を無視して計算するという誤を犯しているので，遮蔽効果を無視できるような配置でなければ誤差が大きく使用出来ない。2 枚の厚みを持つコイル板については，上記の計算式と抵抗紙模擬法による値とを比較したところ，2 枚が対向する場合には精度よく合うが，一直線になつた場合には 30% の差を生ずる場合があつた。理由としてはコイル厚みは充分小さいという理論式であるにもかかわらず，模擬および実物は，コイル厚みが無視できぬほど厚いためと考えられる。3 枚のコイルを考え，間にコイルがある場合の両端のコイル間の容量は全然合致しない。

#### 4. 抵抗紙による模擬

第 3 章で磁界を抵抗紙で模擬する方法を述べたが，電界の問題も抵抗紙によつて模擬することができる。

静電界の方程式は，次式である。

$$\text{div } \epsilon \text{ grad } V^* = -\delta \dots\dots\dots (4.3-31)$$

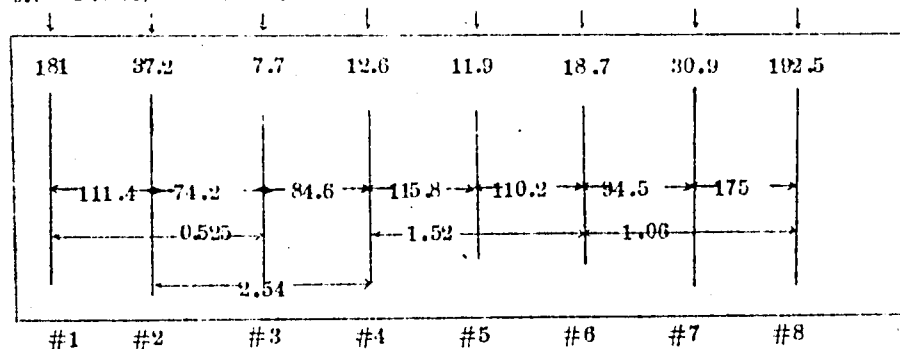
但し  $\epsilon$  = 誘電率       $V^*$  = 静電界電位       $\delta$  = 電荷

この式は第 3 章における定常電流場の式 (3.2-2) とまったく同じ形である。したがつて下記の対応関係をもたせれば，抵抗紙模擬によつて電界が計算できる。

$$\rho = 1/K\epsilon, \quad \delta = mj, \quad V^* = mKV$$

こゝで  $K, m$  は模擬の際の変換係数である。

右図はモデルトランスの鉄心内コイル配置における，奥行き 1 M 当りの静電容量の模擬結果である。



第 4.3-19 図 モデル変圧器の静電容量 PF ( $\epsilon = 1$  とした)

測定の方法は着目する2枚のコイル間、もしくはコイル、鉄心間に電圧を印加し、そのほかのコイルはすべてガードにとつて、着目する2電極間に流れる電流のみを測定して、容量を計算した。

#### 5. ラプラスの式を計算機で解く法

抵抗紙模擬による方法は理論的には厳密であるが、模擬精度が主として抵抗紙の抵抗値のバラッキおよび製図精度で押えられる。さらに悪い点は、問題を解くに要する時間と労力が、磁場の場合よりはるかに小さいが、それでも速応を必要とする場合、試験ケースが非常に多い場合には、問題となる。そこで電子計算機を利用してラプラスの式を解かせようとするものである。誘電率一様な静電場において、空間電荷が存在しない場合、二次元では、(4.3-31)式より次式をえる。

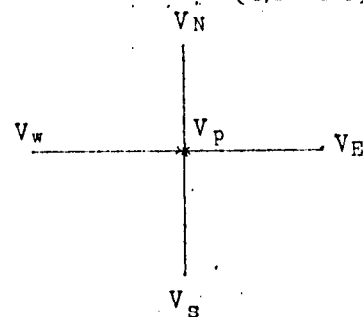
$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (4.3-32)$$

但し  $V$  は静電界電位

これを階差方程式で書き表すとつぎのようになる。 $H$  は微小区間である。

$$H^{-2} \{ V(x_0+H, y_0) + V(x_0-H, y_0) + V(x_0, y_0+H) + V(x_0, y_0-H) - 4V(x_0, y_0) \} = 0 \quad \dots\dots\dots (4.3-33)$$

この式の物理的意味は右図のように、着目点  $P$  に流れこむ電荷（定電流場では電流）の総和は0である、という意味である。



(4.3-33) 式はメッシュポイントの電位を未知数とする一元連立方程式であるが、未知数の数は普通非常に大きく

(1例として  $80 \times 80$ )、掃出法では計算不可能である。第4.3-20図 メッシュ電流で、緩和法によつて問題を解く。このとき計算速度を速めるために加速常数を下記のようにしてきめる。

(4.3-33) 式を

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} x_j = b_i \quad i=1 \sim N \quad \dots\dots\dots (4.3-34)$$

と表したときに

$$x_i^{(K)} = \omega \left[ \sum_{j=1}^{i-1} -\frac{a_{ij}}{a_{ii}} x_j^{(K)} + \sum_{j=i+1}^N -\frac{a_{ij}}{a_{ii}} x_j^{(K-1)} + \frac{b_i}{a_{ii}} \right] + (1-\omega) x_i^{(K-1)} \quad \dots\dots\dots (4.3-35)$$

として反復代入法を用いて解く、こゝに

$x_i^{(k)}$  は  $x_i$  なる変数の  $K$  番目の反復で定まる値

$\omega$  は  $1 < \omega < 2$  なる数で収束加乗常数といわれる

最適な  $\omega$  を選ぶ方法は

$$\lambda^{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^N |x_i^{(m)} - x_i^{(m-1)}|}{\sum_{i=1}^N |x_i^{(m-1)} - x_i^{(m-2)}|} \dots\dots\dots (4.3-36)$$

なる  $\lambda^{(k)}$  を 5 回の反復ごとに 1 回計算し

$$\omega = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - \frac{(\omega - 1 - \lambda)^2}{\omega^2 \lambda}}} \dots\dots\dots (4.3-37)$$

を計算して用いる。ただし

$$\omega \geq \lambda^{(n)} + 1 \dots\dots\dots (4.3-38)$$

になつたら修正は止めて以後の  $\omega^{(n)}$  を用いる。

微分方程式を階差方程式で解く場合には誤差が入るが、その誤差を決定するために、最初はメッシュ数は少くして解き、緩和が収束したのち、メッシュ数を倍にふやして、同じ操作を繰り返し、メッシュ数をふやしても、各メッシュ点における値が許容誤差以下になる迄計算するプログラムとなつている。

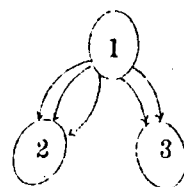
境界条件としては

(1) ある閉曲線上において  $V = \text{const.}$

(2) ある閉曲線上において  $\partial V / \partial n = C_2 + C_3 V$

のもとで解けるようになつている。このプログラムで解いた例としてメッシュ点  $(80 \times 80)$  で  $2/100$  時間で、誤差  $0.27\%$  まで近づいた。

右図のように 3 個の導体が配置された場合、各導体間の容量を求める方法は、抵抗紙模擬におけると同様の手続を計算機にやらせれば良い。たとえば、1, 2 間の容量を求める場合には、1 なる



第 4.3-20 図 静電容量

電極に  $V_1$  なる電位を与え、2, 3 を 0 に保ち、2 に入り込む Faraday 管の数を数えればよい。

Gauss の法則によれば

$$q_2 = \oint_{S_2} \epsilon_0 E dS_2 = \oint_{S_2} \epsilon_0 \frac{\partial V}{\partial n} dS_2 \dots\dots\dots (4.3-39)$$

このプログラムではある閉曲線上の  $\partial V / \partial n$  が求まるようになつているので、2 なる導体表面上について  $\partial V / \partial n$  を積分すれば  $q_2$  が求まり、ついで

$$C_{12} = V_1 / q_1$$

より 1, 2 間の静電容量を求めることができる。

#### 4.4. 解体点検結果

モデル Tr の, AC 短絡による機械力測定試験後のコイル変形, ならびに破損状況について解体点検を行なった。

##### 1. コイル配置

コイル配置は第 4.4-1 図のとおりである。

##### 2. コイル寸法比較

コイル組立まえと, 試験完了解体ごの寸法測定結果を比較するとコイルの垂直方向の変化はあまり見受けられない。

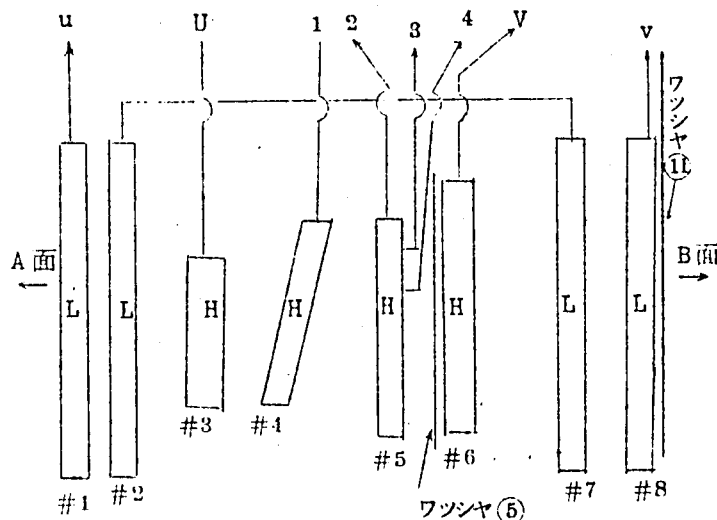
##### 3. コイル破損状況記録

第 4.4-1 表参照

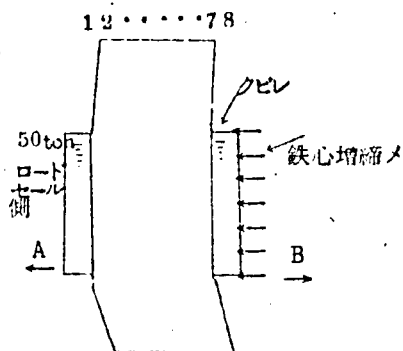
##### 4. 絶縁物損傷状況

コイル間ワッシャでは, 品⑤ワッシャの損傷がもつとも大きい。これは高速度撮影に見られたコイルの巻き方向への運動が影響しているものと思われる。ワッシャ上には縦に「シワ」が発生し, その部分のカルタの角がつぶれている。ちょうど, コイルのターンがカルタの角にひっかかったままズレたのではなからうか? そのほかのコイル間ワッシャでは, コイルの主方向の変形が大きいところに長さ 1 cm 位の「キレツ」が発生しているものが 2 枚あつたがそのほかには思つたほど, 傷はなかつた。ただしカルタは相当枚数ハガレたものがあるが, これは工作上貼り方の不確実による要因もあつて, いちがいに機械力によるものとはいにくい。しかしほかに分解したコイルにくらべれば, ハガレた数がやゝ多いので, とくに機械力をうんぬんするコイルに対しては確実に貼りつけることが望まれる。

低圧コイルと鉄心間ワッシャは #1 コイル側 #8 コイル側ともにまったく同様の傷が見られるが, このおもな原因は, 鉄心の締付によるクビレとおもわれる。コイル点検時, コイル全体が第 4.4-2 図のように B 側 (#8 コイル側) に曲つていたのは短絡試験中に締付荷重が減少したときに締め直しをおこなつたが鉄心部をたえず片側を増締めしていったために生じたものである。



第 4.4-1 図 コイル配置図

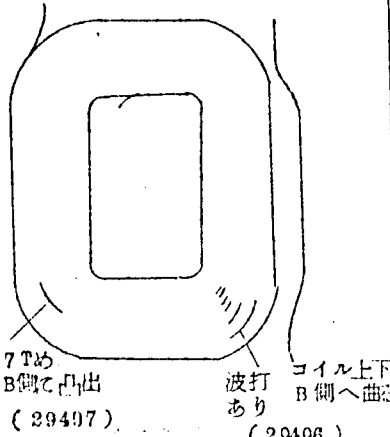
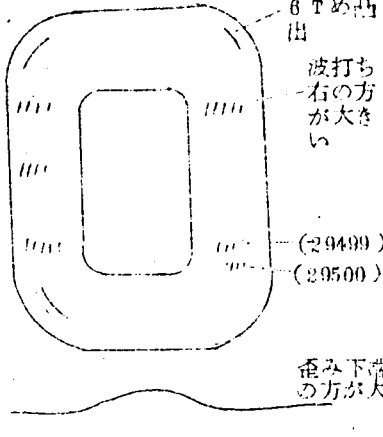
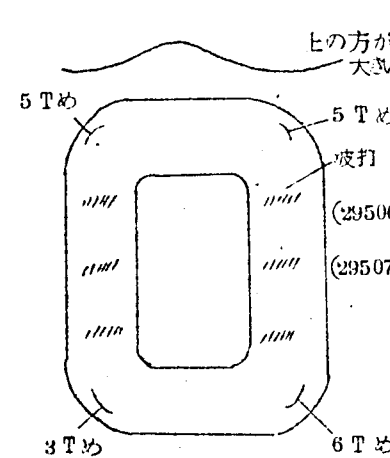
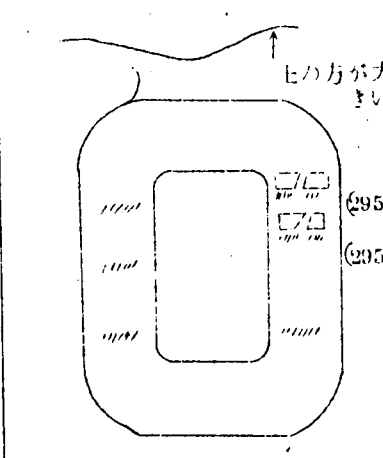
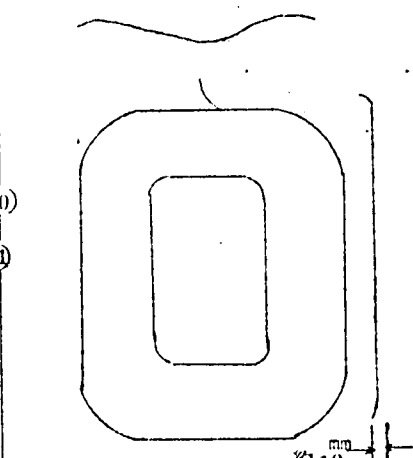


第 4.4-2 図

## オ 4.4-1 表 コイル破損状況一覧表

表中 A 面 B 面とあるのは第 4.4-1 図のコイル配置の時、向つて左側を A 面、右側を B 面とする。図はすべて B 面より見たもの。

( ) は写真番号

<p>#1 coil (29495~29497)</p>  <p>鉄心部から出た部分で、B 側へ大きく曲つている。これは鉄心の締付が片寄つていたのではないかとと思われる。</p>	<p>#2 coil (29498~29500)</p>  <p>主方向の曲りが大きい。カルタ無支持部分が A 側へ曲がりカルタの当る部分で B 側へ凸出したような形になり、接着紙が破れている。</p>	<p>#3 coil (29501)</p> <p>LV コイルとの反発力による主方向の曲りは、#2 コイルと対応して、はつきりとみとめられるが、比較的小さい。そのほかには、大した損傷はみうけられない。</p> <p>#4 coil (29502)</p> <p>わずかな波打があるがほとんど無傷である</p> <p>#5 coil (29503)</p> <p>ほとんど無傷である。上端でわずかに A 側へ曲つている。</p>
<p>#6 coil (29504~29507)</p>  <p>L.V #7 コイルとの反発力による主方向の曲りが大きい。A 面をみると、品⑤ワツシヤに貼られたカルタの痕跡が残り紙マキが破れている (295 (29507) 上端で、図のように彎曲している。</p>	<p>#7 Coil (29508~29512)</p>  <p>コイルの損傷はもつとも大きい。カルタ鋭角部が喰込んだようになつて紙マキが破れている。いづれも #6 コイルと完全に対応している。紙マキの破れも一番ひどい</p>	<p>#8 coil (29513)</p>  <p>部分的な変形は比較的小さいが上端、下端における B 方向への「そり」が大きい。鉄心部分と上下クサビ部分との締付のアンバランスによるものとおもわれる</p>

## 4.5 結 言

外鉄形変圧器の短絡試験を実施するにあたり、モデルトランスの構造を測定に便利なようにつくつたために、いろいろの情報をえることができた。

1. 変圧器の締付力はプレスボードの永久撓みのために短絡のたびごとに緩み、同一荷重に対しては10回でいどでおちつく。短絡電流が増加すると、いったんおちついたゆるみもまた緩みはじめる。ゆるみの量は、短絡電磁力にほぼ比例すると考えてよい。
2. 主方向電磁力は電流の2乗に比例するが、位相は電磁力よりも多少おくれる。短絡時にもっとも大きな主方向電磁力の発生するのは、直流分が最大に入つたオ一波の波高値である。抵抗紙模擬による推定値は実測とよい一致をみた。コイル間電磁力は、おのおのに働く電磁力の差と考えると推定と一致する。
3. 垂直方向電磁力は、高圧コイルに関しては、推定値にコイル巾中央寸法を乗じたものとほぼ一致するが、低圧コイルに関しては一致しない。理由はこんどの検討にまきたい。
4. コイルは短絡電磁力によつて運動するが、運動の方向は変圧器の底より見たとき主方向、垂直方向、および巻き方向の3つがある。主方向の運動はカルタ、ワッシャーの撓みによるものであるが、コイルエンドの楔が弱いところの撓みが大きく効き、楔を破損することもある。巻き方向の運動は鉄心内の垂直方向電磁力によるもので、いったんずれはじめるとますます増大する危険性をもつ。これを防ぐために鉄心内の磁気中心は一致させる必要がある。コイル群は、高圧、低圧はおのおのが寄りあつまり、高低間でずれを生じるものであるから、短絡時にも高低間か口を開けないように、組立時にコイルエンド部の楔を効かせるほうがよい。

またゆるみが進展しないように、楔そのものの強度を増し、またプレスボードの性質を改善する必要がある。

5. 故障検出はイムピーダンス、キャパシタンス、固有周波数によつてある程度可能である。とくに設計資料を充分に活用し、あるいは仮定を立てれば、故障の程度も大略推定できよう。こんどの問題としては電子計算機とサーヂ波形、もしくは高次までの固有周波数の測定を組合せ、より正確な故障位置の推定ができるようにすることである。
6. 試験後の解体点検結果では、カルタビッチが長すぎ、主方向に素線が彎曲し、コイル絶縁紙が破れているところがあつた。またカルタの形状の尖つた部分はコイル絶縁紙に傷をつけるので好ましくない。

垂直方向電磁力にたいしては、このモデル変圧器は十分な強度をもつていた。

## 文 献

## 1) 新井 浅井

2000 KVA電力用変圧器短絡強度試験報告

34-5-20 (未発表)

## 2) 山村 山内

内鉄形変圧器の短絡破壊試験

38年 連合大会 738

## 3) 大谷 田村

外鉄形変圧器の短絡強度試験

39年 連合大会 610

## 4) M. Christoffel, T.Harter

Study of the Short-Circuit Radial Stresses of Transformer Windings by Means of Reduced Scale Models.

CIGRE No.112 1960

## 5) E.Pirktl, G.M.Spallanzani

Recent Advacements in the Field of Short-Circuit Forces in Transformer Coils

CIGRE No.122 1962

## 6) M.Oyama, S.Fujitaka, J. Tomiyama, S.Asakawa.

A Study of the Short-Circuit Strength of Transformer Windings by Means of Models.

CIGRE No 123 1962

## 7) L.Torseke

Short-Circuit Problems in large Transformers

CIGRE No 142 1962

## 8) A.B.Madin, J.D.Whitaker,

The Dynamic Behaviour of a Transformer Winding Under Axial Short-Circuit Forces.

PIEE Vol 110 No 3 MARCE '63

## 第5章 整流器用変圧器の逆弧短絡試験

直流変換装置は現在の技術レベルでは未解決の点も多く、整流装置は1年に50回程度の逆弧を起す可能性があるとしてされている。整流器の逆弧は整流器用変圧器にとつて見れば、整流器のアークドロップで短絡であつて、普通このアークドロップはきわめて低く、さらにまた整流装置と変圧器の距離もきわめて近いところに設置されるのが普通であるから、整流器の逆弧は変圧器の端子短絡と考えてよいことになる。したがつて電流値は交流短絡と同程度になるものと推定されるが、ただ整流器と組合されているために、電流波形は正弦波とは大部異つたものとなる。第4章において交流短絡の現象は説明されたのであるが、この章では整流器逆弧電流が変圧器に流れた場合どうなるか、とくに正弦波とは異なり整流波形が流れた場合にどうなるかに重点を置いて研究を行なつた。

### 5.1 試験回路および測定

整流回路は三相全波整流回路を使用し、その中の一相を逆弧させた場合の電流に対して、変圧器がどのように働くかを調べたのであるが、変圧器は交流短絡試験に用いたと同一仕様のもを3台作り、Y-Y、 $\Delta$ - $\Delta$ の2通りの結線で測定した。電氣的諸量は、三相の相互関係がわかるように測定し、機械的諸量は3台の中の1台のみについて測定した。

#### 5.1.1 逆弧電流の計算

試験にさきだち、逆弧電流の電流値および波形の検討をおこない、三相の変圧器の中どの相を測定すれば、交流短絡試験とはちがつた現象が捕えられるか考察した。

##### Y-Y結線

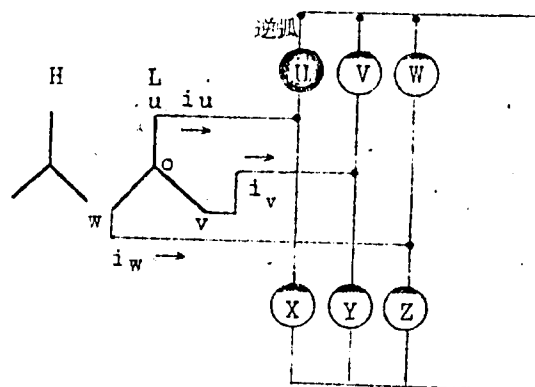
右図の如く、変圧器は単相3台をYに接続し、三相全波回路でU相が転流直后から逆弧した場合について考える。

ただし直流負荷は0

点弧角  $\alpha = 0^\circ$  とする。

$\theta = 0$  の時点で逆弧が始まると、期間Iの間は

U相の逆弧電流はV相から供給される。変圧器



第5.1-1図 Y-Y結線回路



にとつて考えてみればU V 相間の短絡である。

$\theta = 120^\circ$ に至ると、W 相が点弧するので、V

W の 2 相から電流を供給する（期間 II）。

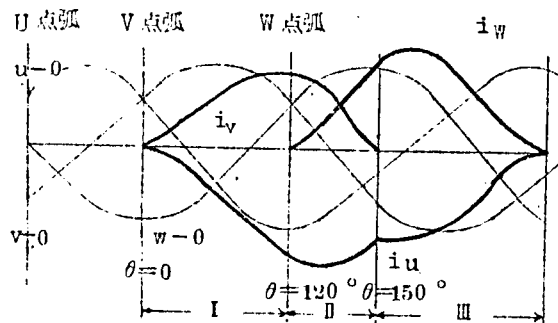
$\theta = 150^\circ$ に至ると、V 相の電流が終り、W 相

だけで逆弧電流を饋電することになる（期間 III）。

直流側からの流入電流は負荷 0 であるので 0 で

である。第 5.1-3 図は上記の過度現象を数式

化し数値計算を行なつた結果で



第 5.1-2 図 逆弧電流説明図

三相短絡電流 (r.m.s)  $I_{\ell} = \frac{E_g}{Z_{\ell}}$  とし、

但し  $E_g$  変圧器の相電圧実効値

$Z_{\ell}$  変圧器の正相インピーダンス（1 相分）

上記  $I_{\ell}$  に対する比、 $k$  で逆弧電流、V、W 相電流値の大きさ、および逆弧電流流通期間をあらわしている。この図は回路力率  $R/WL$  をパラメーターとし、さらにまた急速遮断（逆弧開始後  $120^\circ$  以内に遮断）と普通の遮断の場合の 2 とおりの電流波形が示されているが、最も苛酷な条件を考えると

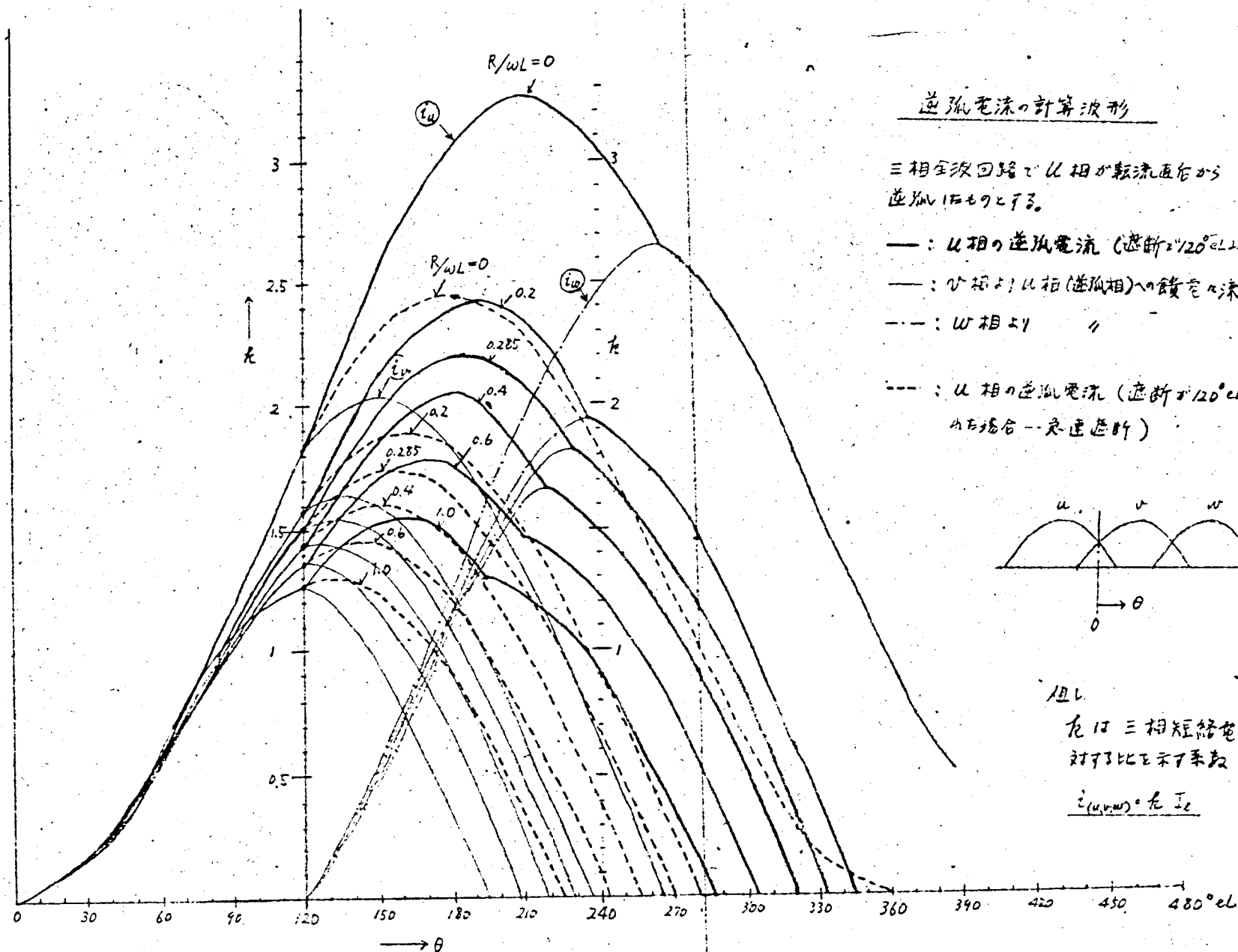
$i_u$  :  $k = 3.25$

$i_v$  :  $k = 2.0$

$i_w$  :  $k = 2.65$

である。Y Y 結線の場合は、線電流 = 相電流であるので、逆弧電流は変圧器短絡電流となる。

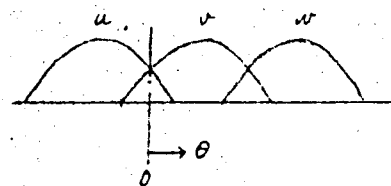
したがつて U 相逆弧の場合には U 相に被試験器の変圧器を置けばよいことがわかる。モデル変圧器は 6600-6330-6060V/1300V の定格電圧であるが、一次電圧の 6KV は油なし構造にしたために絶縁の点から定まつた値であり、二次電圧、1300V は整流器と組合わせたとき、標準のセットを用いて 0.1500V をえられるように選んだのであるが、Y Y 結線の場合は単相変圧器にとつて考えると  $1/\sqrt{3}$  に電圧を下げて使用されることとなり、逆弧による電磁力はわりあい小さい。しかし逆弧による短絡試験は波形の差による影響を見るのが第一であるのでこの程度でも十分と考える。



### 逆弧電流の計算波形

三相全波回路で  $u$  相が転流直前から逆弧に転流とする。

- :  $u$  相の逆弧電流 (遮断角  $120^\circ$  以上迄の右端迄)  $\dots i_u$
- :  $v$  相より  $u$  相 (逆弧相) への誘電電流 (全上)  $\dots i_v$
- :  $w$  相より  $u$  相 (全上)  $\dots i_w$
- :  $u$  相の逆弧電流 (遮断角  $120^\circ$  以内に行かぬ場合 - 急速遮断)



但し

$i$  は三相短絡電流 ( $I_L = E_s / Z_c$ ) に対する比を示す数

$$i_{(u,v,w)} = i I_L$$

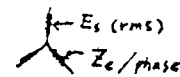
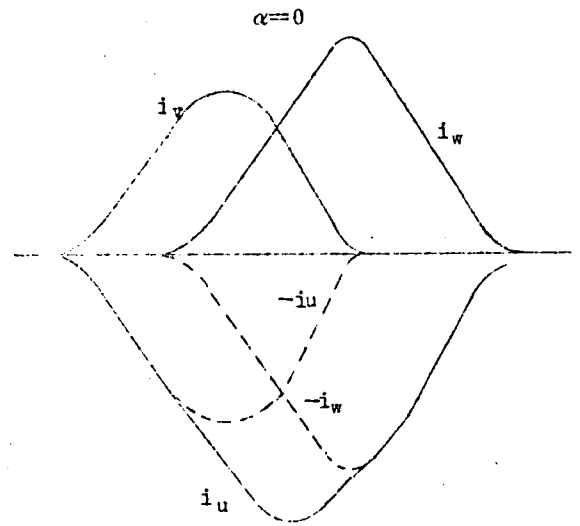
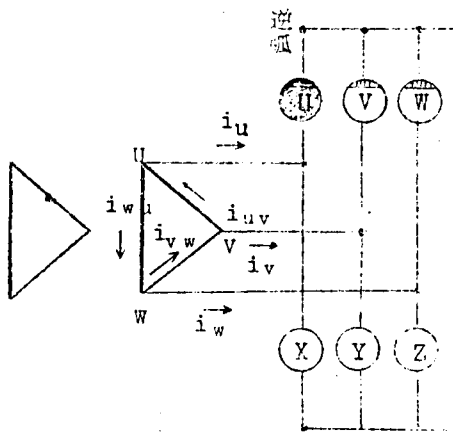


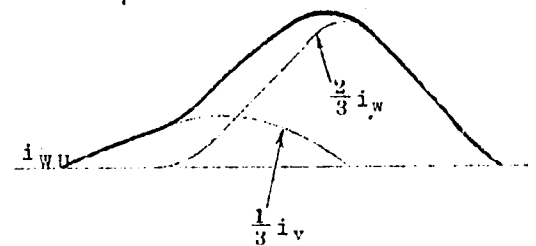
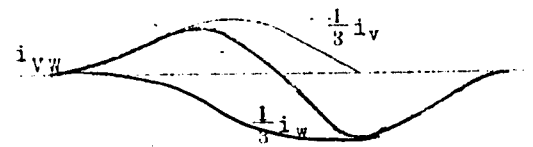
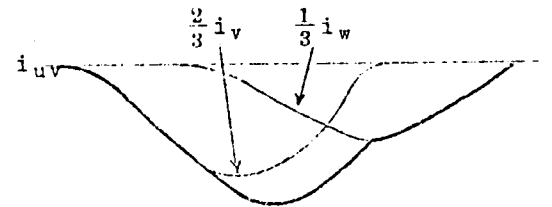
表 5.1-3 図 逆弧電流の計算波形

△△結線



第5.1-4図 △△結線回路

上図のように△△結線3相全波整流回路の場合にも、線路電流 $i_u, i_v, i_w$ はYYの場合と同様に求まる。しかし△△結線であるために、逆弧電流と変圧器電流とは等しくなく、右図のように合成される。 $i_{uv}$ 波形はYYの場合と同じ形なので、△△結線の場合には被試験変圧器はWU相に付けることとする。



5.1.2. 試験および測定回路

試験回路は大別してつぎの3つからなる。

1. 整流器回路
2. 変圧器回路
3. 測定回路

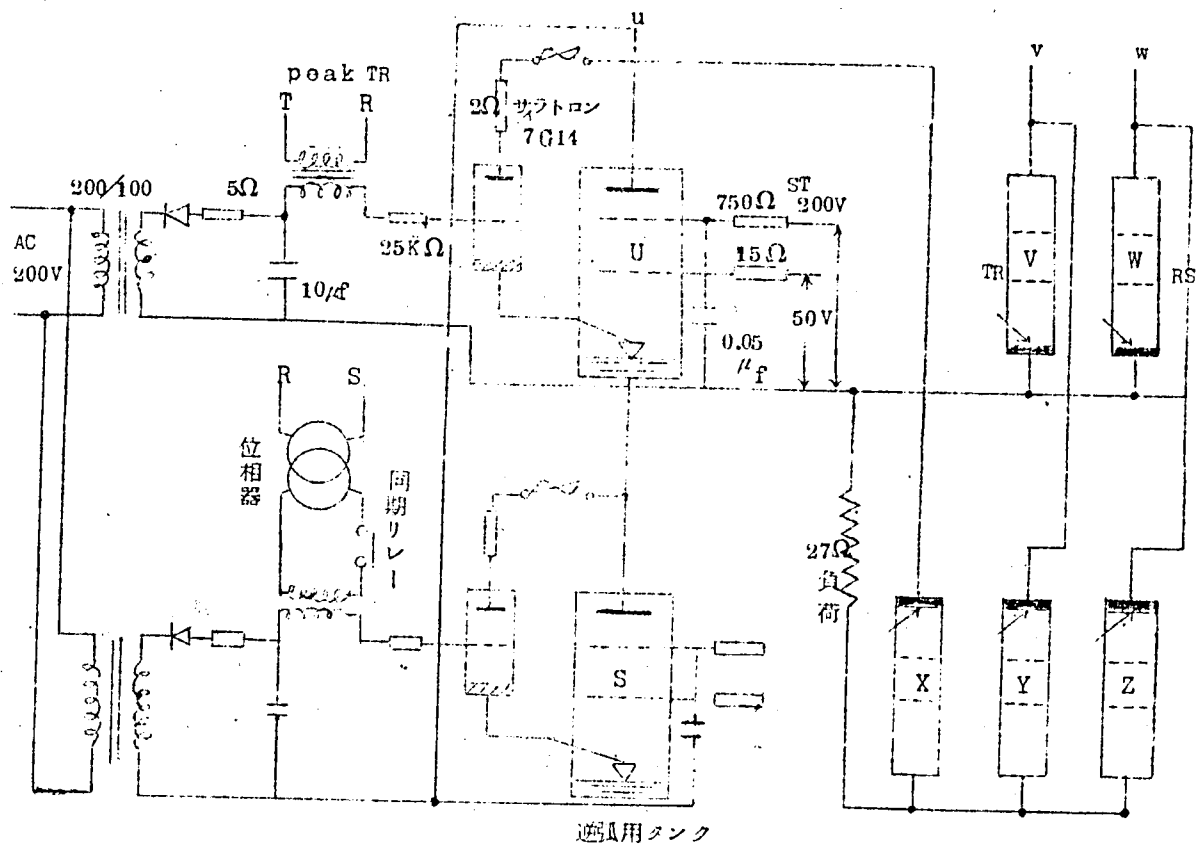
整流器回路

整流器はGZ51 6本を使用し、三相全波回路に結線し、U相には同じGZ51 1本を逆並列

に接続した。制御回路電源は工場ラインより供給した。短絡試験用発電機は同期電動機によって駆動されるので、いちど工場ラインと位相関係を合わせておけばよいわけであるが、ただ発電機の励磁によって電動機の負荷が変り位相が変るので、この点を考慮し電動機の励磁を変えて位相合わせを行なった。また逆弧用イグナイトロンの点弧回路は、ピークトランスの前に位相器

第5.1-5図 逆弧電流を変圧器電流に分解

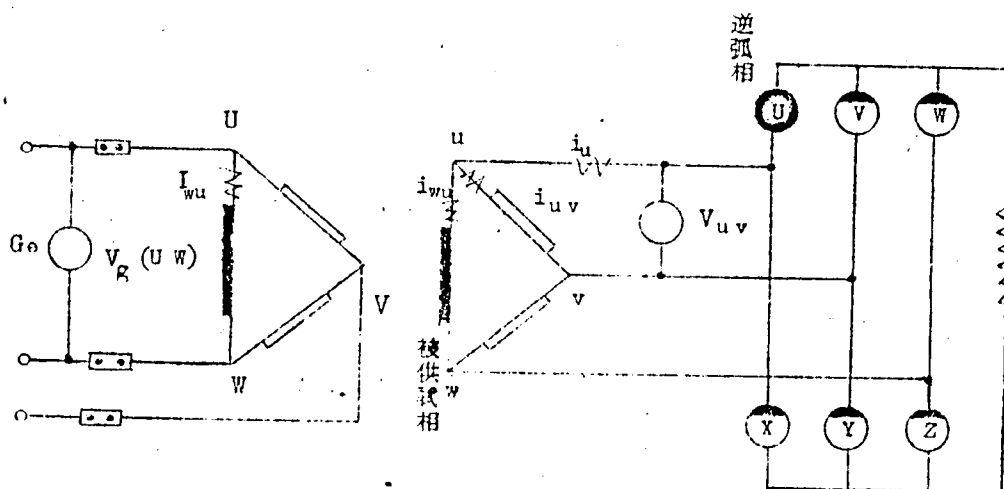
を入れて、U相が転流直後に逆弧する位相を探した。電磁オシロとの同期はピークトランス出力にリレーをそり入して、逆弧開始の時期を制御した。下図は整流器回路の重要部分である。



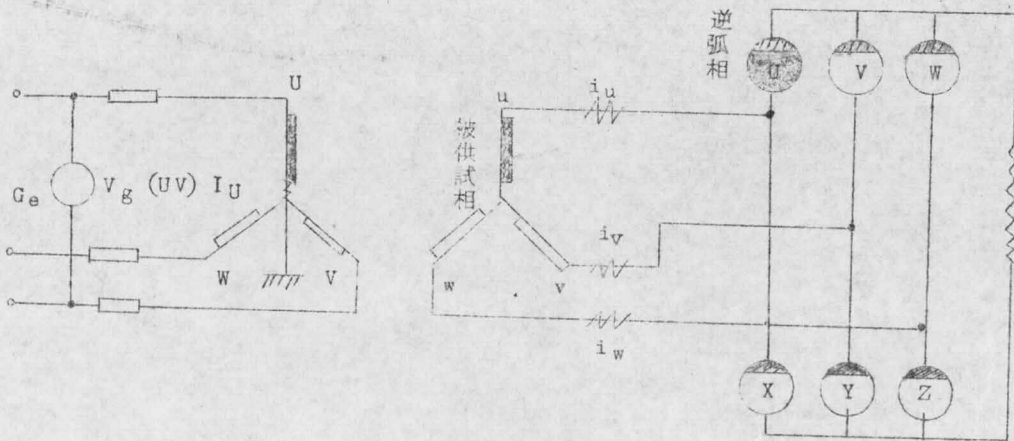
第 5.1 - 6 図 整流器回路

変圧器回路及測定回路

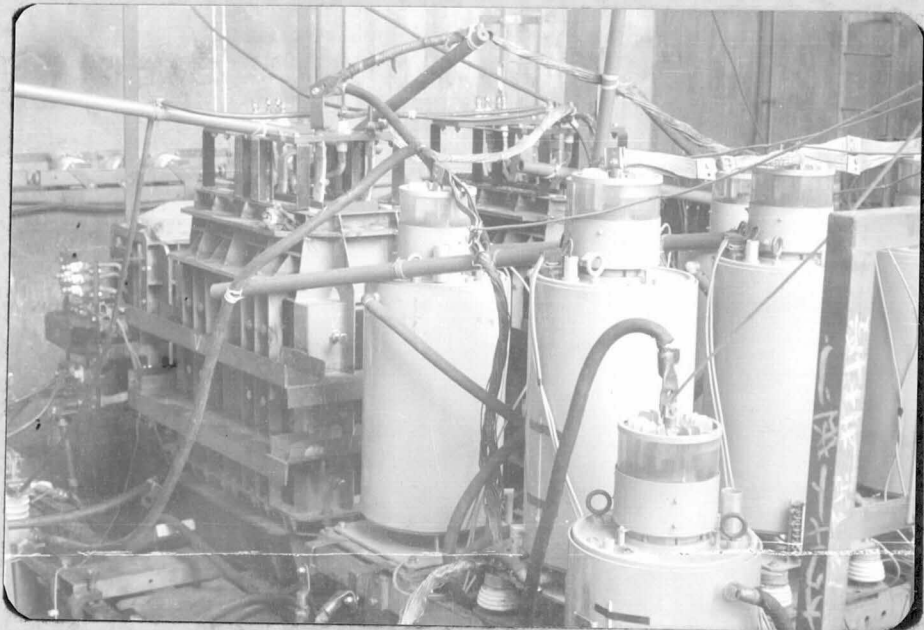
電気関係は下図の通りである。写真第 5.1 - 9 図参照



第 5.1 - 7 図 整流器回路



第 5.1 - 8 図 Y Y 結線



第 5.1 - 9 図 変圧器と整流器の組合わせ

上図は試験状況を示す写真である。被供試用変圧器は一番奥に横倒しとなつてゐる。手前に陽極だけ見えるイグナイトロンは、逆弧を等価的に起させるために、逆並列に接続した整流器である。

変圧器に関しては下記の事項を測定した。交流短絡の場合とはほとんど同じである。

短絡試験中	主方向電磁力 (50 T ロードセル)			短絡試験後	主方向締付力の変化	
	# 1 ~ # 2 間電磁力				コイルエンドにおけるコイル移動量	
	# 2	左	垂直方向電磁力		コイル残留歪	
	〃	右	〃		巻線対地容量	
	# 3	左	〃		固有周波数	
	〃	右	〃			
	# 6	左	〃			
	〃	右	〃			
	# 7	左	〃			
	〃	右	〃			
	# 7	コイルの動き左右				
	〃	〃	上下			

## 5.2 試験結果

試験は△△結線で12回、YY結線で9回実施した。電流は一次側供給電圧を変えることによつて、50%~100%に調査したが、△△結線においては、一次供給電圧5KV<sub>eff</sub>、整流器電流25KA (peak) 以上になると、雌金相が逆弧を始め本来の目的には合致せず、交流短絡と似通つた現象になつた。YY結線の場合は、変圧器の端子間電圧は供給電圧の $1/\sqrt{3}$ になり、整流器出力電圧1500Vに相当する一次線間電圧6.6KVにおいて、整流器電流は24KA (peak) で正常な動作であつた。試験結果の一覧を5.2-1表、5.2-2表に、また代表的なオシロを第5.2-1図、第5.2-2図に示す。

### 5.2.1 変圧器締付力

変圧器は試験前の組立時に、全荷重5TONで締付けておいたが、短絡を重ねるにしたがい締付荷重は低下した。整流器逆弧による短絡の場合は交流短絡の場合と異なり、最大電流は短絡期間中はほとんど変わらないので、交流短絡と比較すると同一電流に対するゆるみは少し早いようである。短絡時間は3~5サイクルあるので、1回の短絡は交流短絡の3~5倍回に相当する。次図はYY、△△の全試験ケースにおける締付力の変化状況を画いたものであつて、電流は変圧器一次電流7KAを100%としている。

才5.2-1表

直流側短絡試験結果

(△△)(0-Peak) 38.12.19

番号	一次無負荷 電圧 kV	一次電流 kV(Peak)	タ ツ ヲ	緊付力 TON	主方向	φ1~φ2	φ2 左	φ2 右	φ3 左	φ3 右	φ4 左	φ4 右	φ7 左	φ7 右	φ7個位 (A×1)	φ7個位 (RAD)	備 考
19-1	4	1.66	大								-8.65	-24.0	0		2.71	-0.10	
2	4		大														
3	4		大														
4	4	3.44	大		4.86	79.4	8.98	39.8	111.2	120.6	343.0	102.3	-30.0	44.6	0.97	-0.34	
5	4	3.33	大		2.98	67.6	16.2	47.0	112.1	104.5	135.0	84.2	43.5	46.3	0.86	-0.34	
6	4	4.11	小		4.23	76.0	54.6	27.5	115.0	94.1	181.5	160.3	64.7	54.8	0.91	-0.33	
7	4	4.04	小		4.86	72.8	59.0	44.4	90.9	70.2	118.7	16.1	60.1	62.2	0.85	-0.35	
8	6		小														
9	6	4.99	小		7.10	108.8	56.2	10.0	187.1	143.0	290.0	250.0	85.1	77.1	1.17	-0.50	
10	6	6.06	小		7.66	145.0	15.3	34.2	282.0	246.0	42.5	450.3	286.0	154.3	1.88	-0.42	
11	6.6	7.08	小		10.4	207.0	86.5	35.6	388.0	340.0							
12	6.6	6.84	小		12.8	210.0	32.1	46.0	401.8	339.0	733.1	686.6	335.8	276.6	2.24	-0.42	

才5.2-2表

直流側短絡試験結果

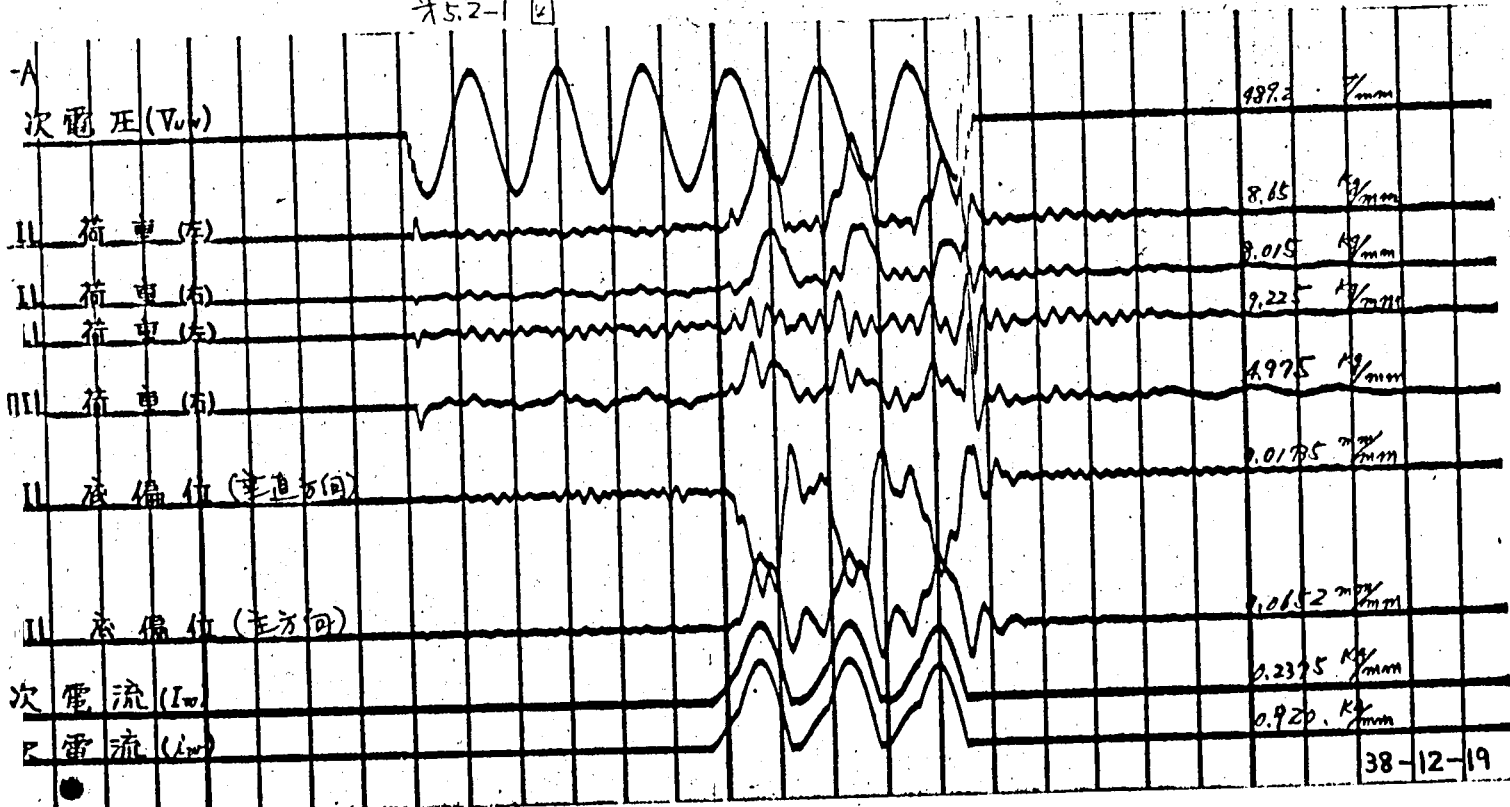
(YY)(0-Peak) 38.12.21

番号	一次無負荷 電圧 kV	一次電流 kV(Peak)	タ ツ ヲ	緊付力 TON	主方向	φ1~φ2	φ2 左	φ2 右	φ3 左	φ3 右	φ4 左	φ4 右	φ7 左	φ7 右	φ7個位 (A×1)	φ7個位 (RAD)	備 考
21-1	3	1.95	小			26.5	11.3	10.1			-8.97	-4.63	53.6	35.6	0.33	-0.09	
2	3	2.02	小		0.20	25.3	8.56	8.10	5.35		-15.2	7.30	47.2	29.6	0.29	-0.08	
3	4	2.86	小		0.18		6.90	6.19	3.04	1.23	29.9	39.2	90.5	47.9	0.57	-0.12	
4	4	2.30	小		1.63	56.2	16.1	12.3	32.9	18.7	24.4	33.8	89.3	46.7	0.53	-0.12	
5	6	3.07	小		1.67	68.2	13.3	23.8	61.0	45.6	74.1	77.3	90.1	49.3	0.74	-0.16	
6	6	4.37	小		6.01	103.2		14.4	82.4	94.0	140.8	157.4	153.0	91.2	1.12	-0.25	
7	6.6	4.77	小				16.2				159.9	287.9	178.5	68.3	1.43	-0.31	
8	6.6	4.68	小		7.92	123.0		24.5	178.9	192.0	184.8	282.2	170.0	-99.3	1.27	0.32	
9	6.6	2.93	小		1.06	57.3	9.36	8.80	55.0	52.6	35.9	72.7	-119.0	54.7	0.57	-0.15	

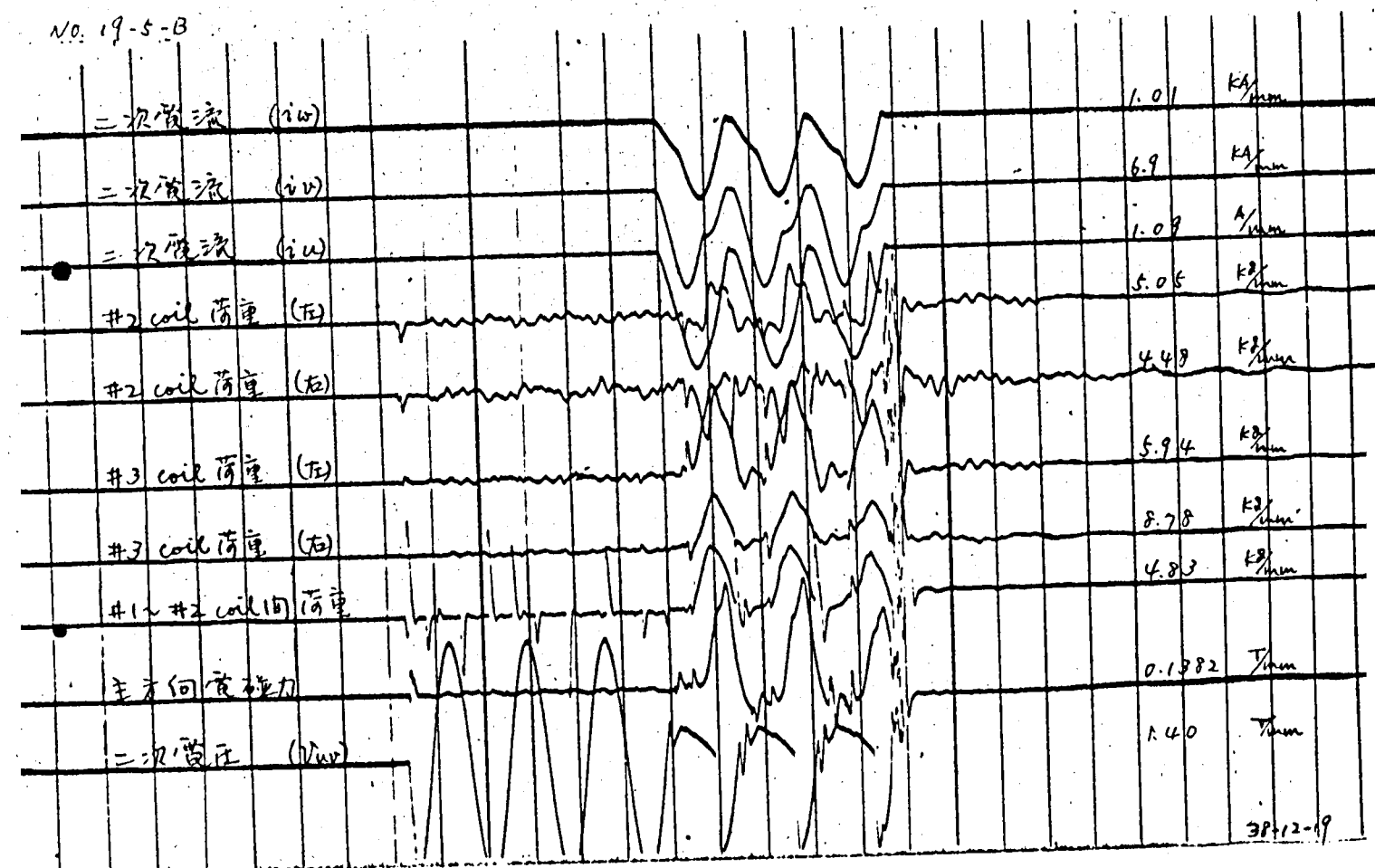
技術ノ平

17790

5.2-1 ④



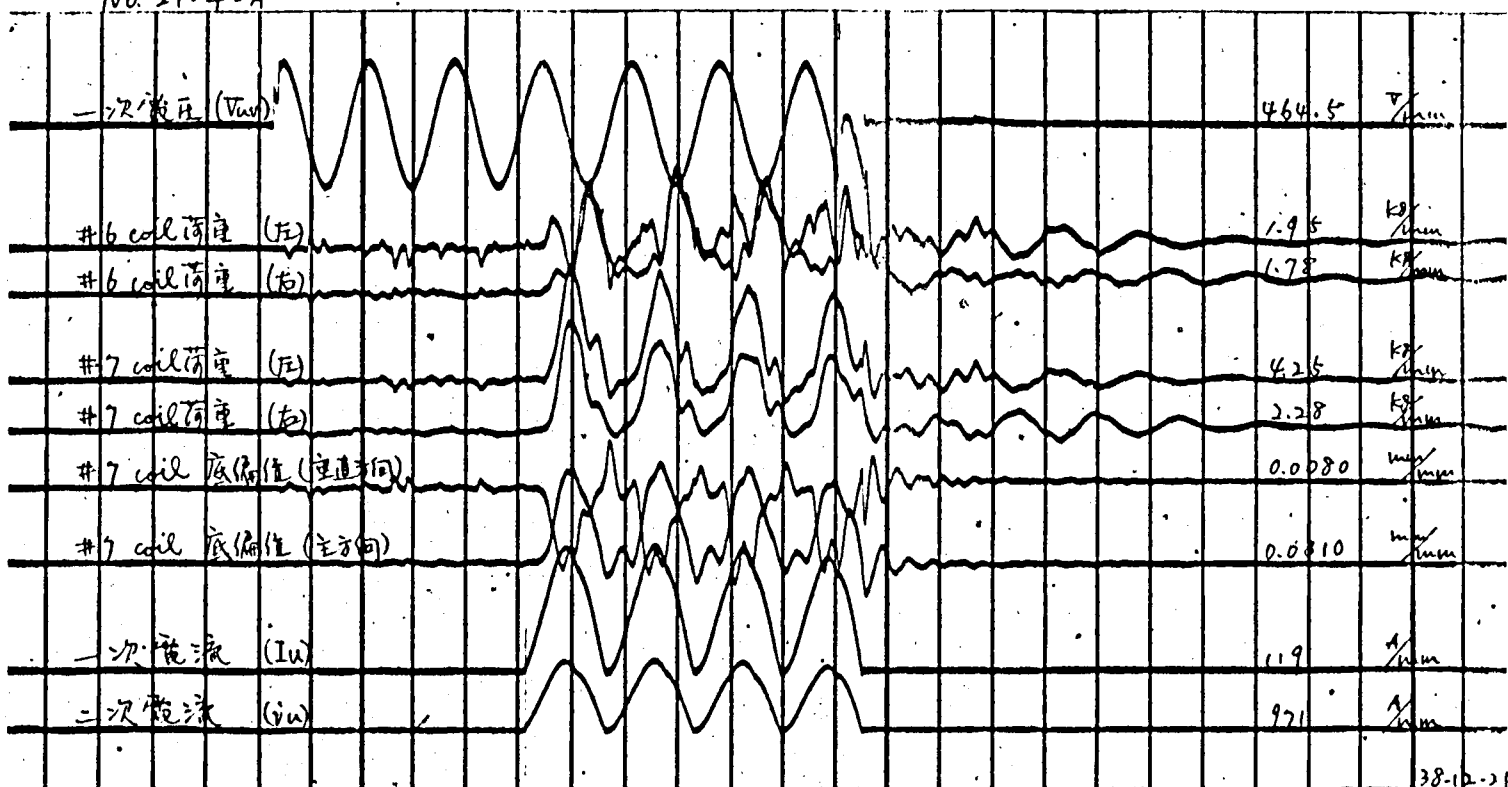
NO. 19-5-B



5.2-1 図 ΔΔ 結線，透紙短絡試験ナリ。

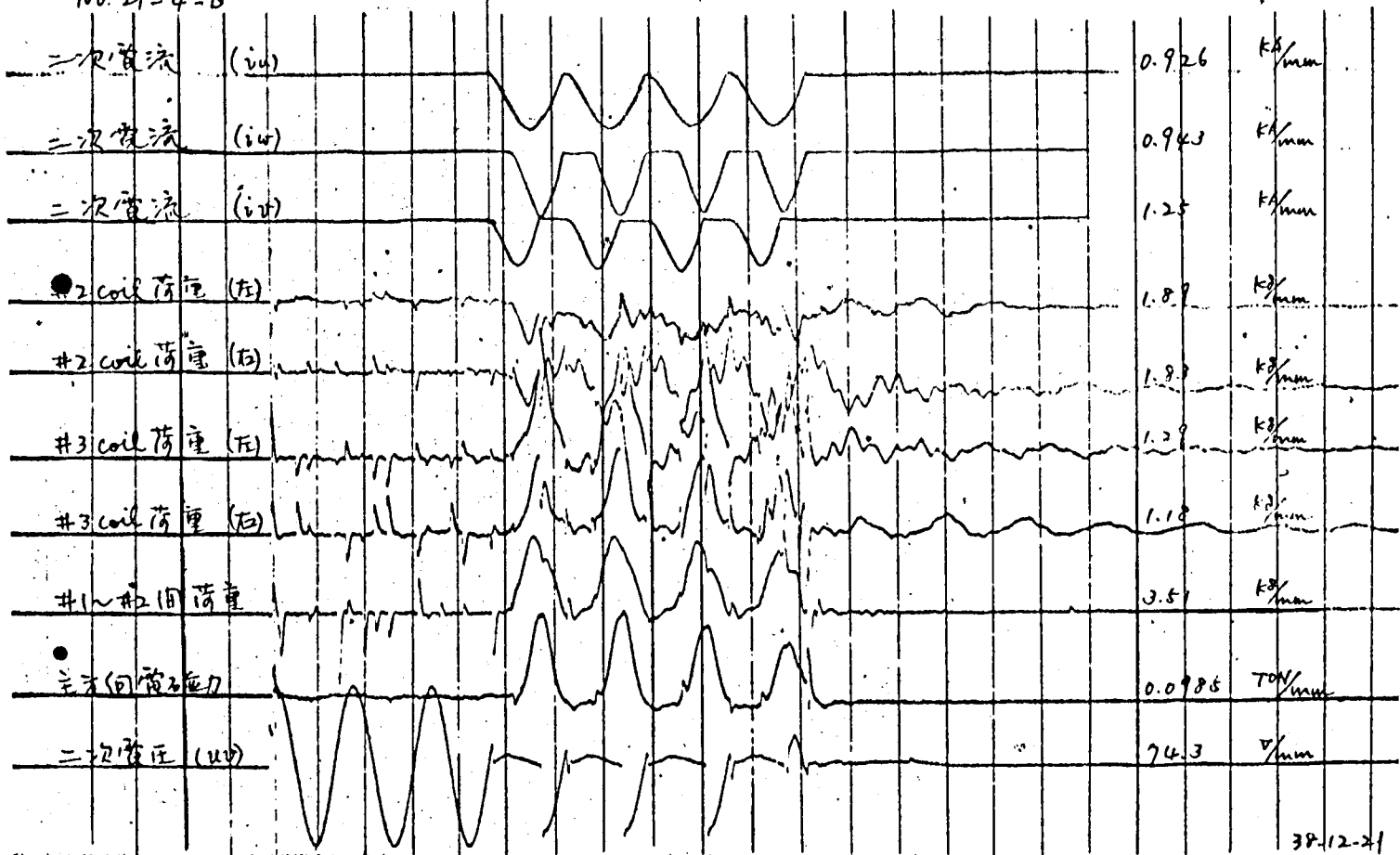


No. 21-4-A

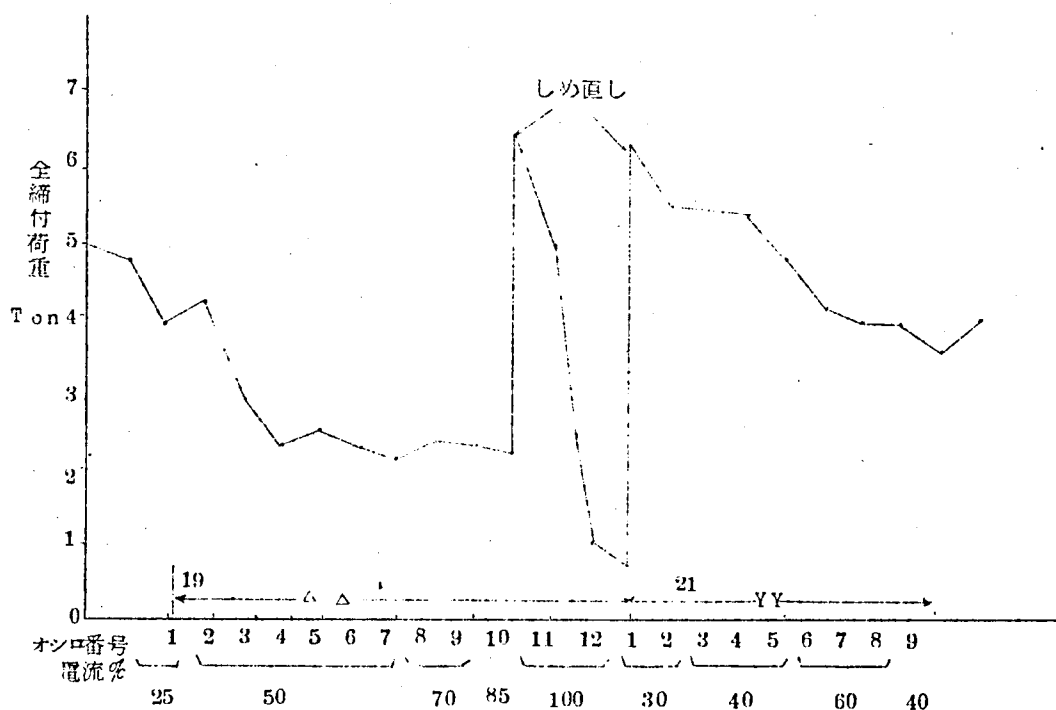


38-12-21

No. 21-4-B



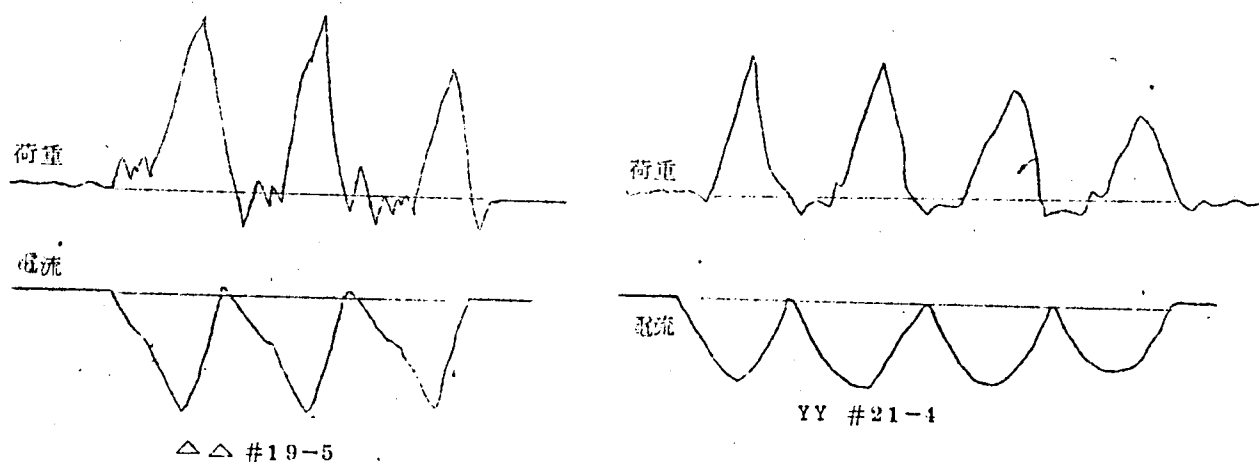
38-12-21



第5.2-3図 締付荷重の変化

## 5.2.2 主方向電磁力

△△およびYYの場合の代表的な波形を示すと次図のようになる。変圧器に流れる電流波形は第5.1-5図に図解したものとまったく同じ形である。



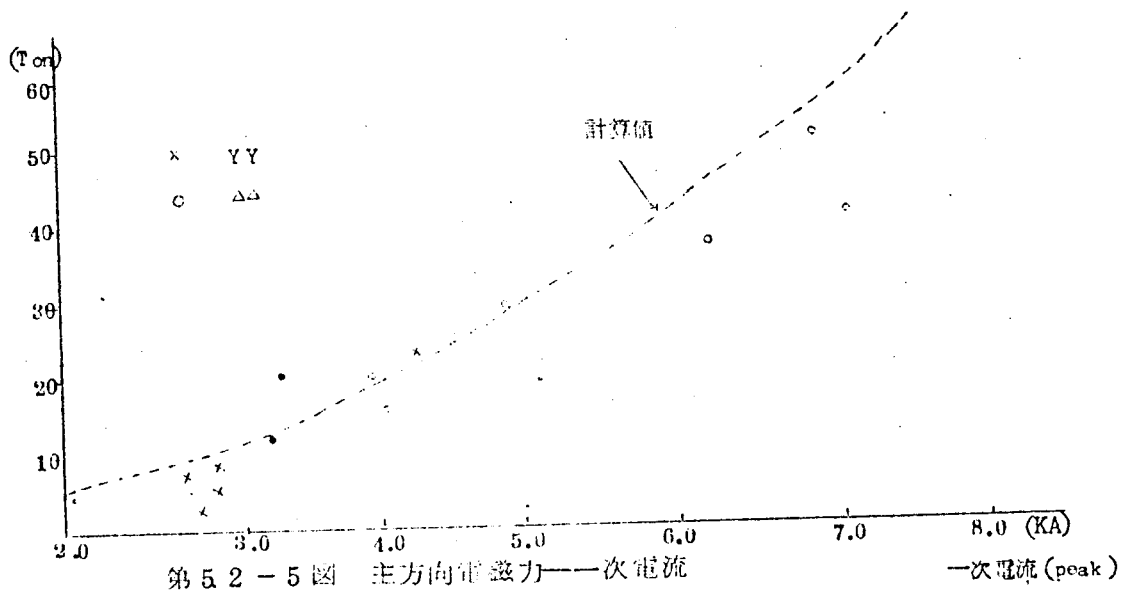
第5.2-4図 主方向電磁力波形

電磁力の波形は電流波形よりは尖った形になるのは、交流短絡の場合にも説明したように、プレスボードは荷重の小さい間は歪み量が大きく、運動のエネルギーを食われて鉄心に伝わる電磁力が削減されるが、荷重が大きくなると急激に歪みが減る非直線性によるものであろう。位

相は電流に対して遅れているが、荷重の応答は割合早く△△短絡の場合の電流の段は、荷重にも表われている。

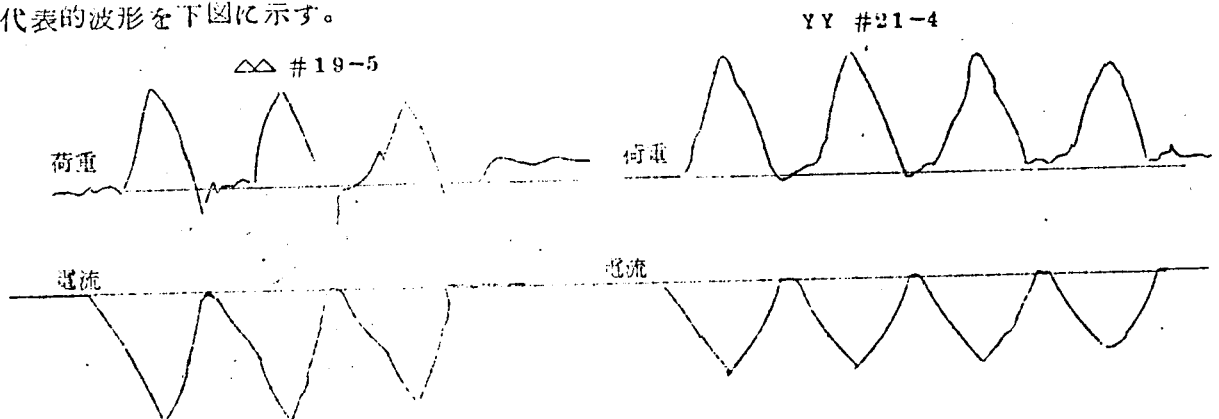
短絡電流対荷重の関係は、下图のグラフのとおりであつて、交流短絡の場合とほとんど一致している。すなわち言葉を変えていえば推定とよく一致している。

短絡強度を決定するのは波高値と考えるならば、交流短絡と直流短絡の波高値を合せば等価であるが、直流の場合は電磁力に120 サイクル成分が少ないので、動的に考える場合には差がある。



### 5.2.3 コイル間荷重

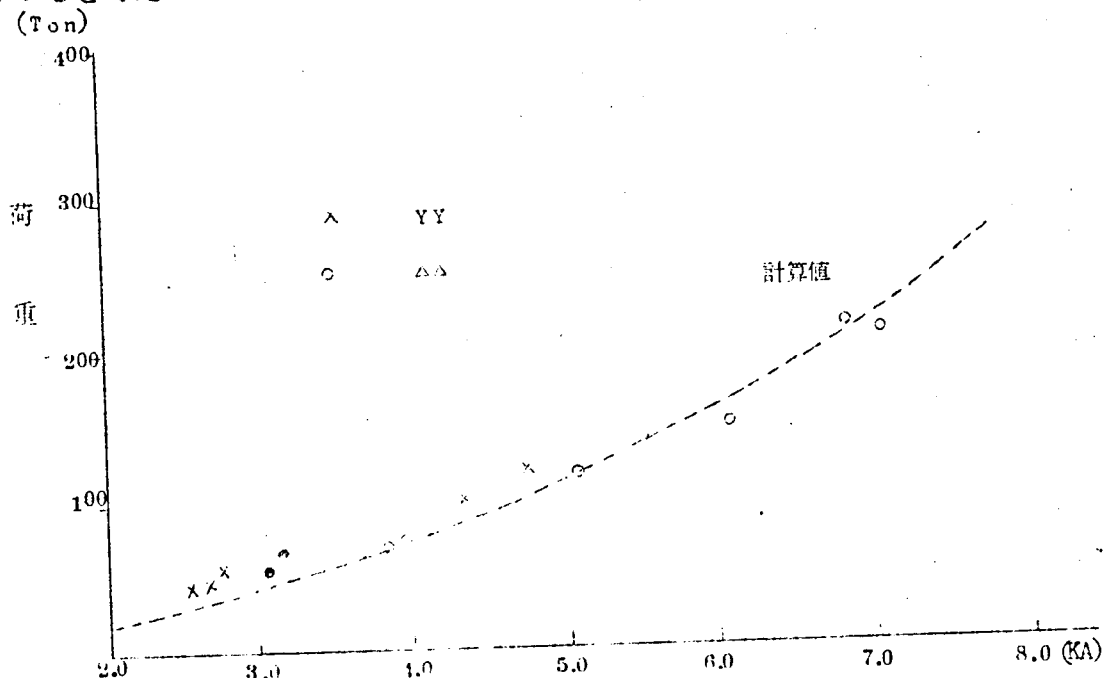
代表的波形を下図に示す。



第5.2-6図 コイル間荷重

コイル間荷重は主方向電磁力よりも電流波形に忠実のようである。主方向電磁力はプレスボード自身の特性の外に、コイル群として組みあげたときのチャンネルのBuild upを殺しながら、荷重が鉄心に伝えられるので、過み量も必然的に大きくなるが、コイル間では、カルタだけの性質が現れるためであろうと考える。

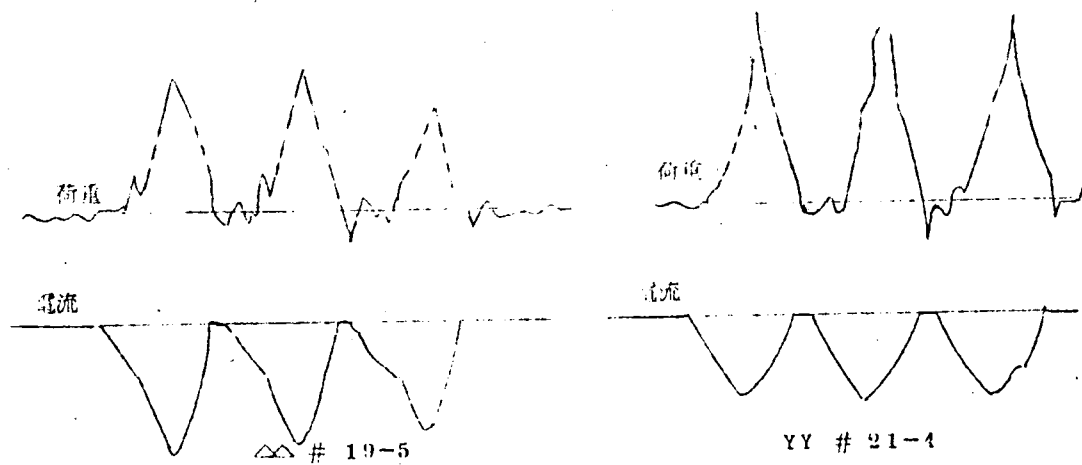
荷重の大きさは短絡電流の2乗に比例して増加する。荷重計の表面積 $20\text{cm}^2$ の分だけが荷重計にかゝると考えて推定値と比較するとよく一致する。



第5.2-7図 コイル間荷重——一次電流

#### 5.2.4 垂直方向電磁力

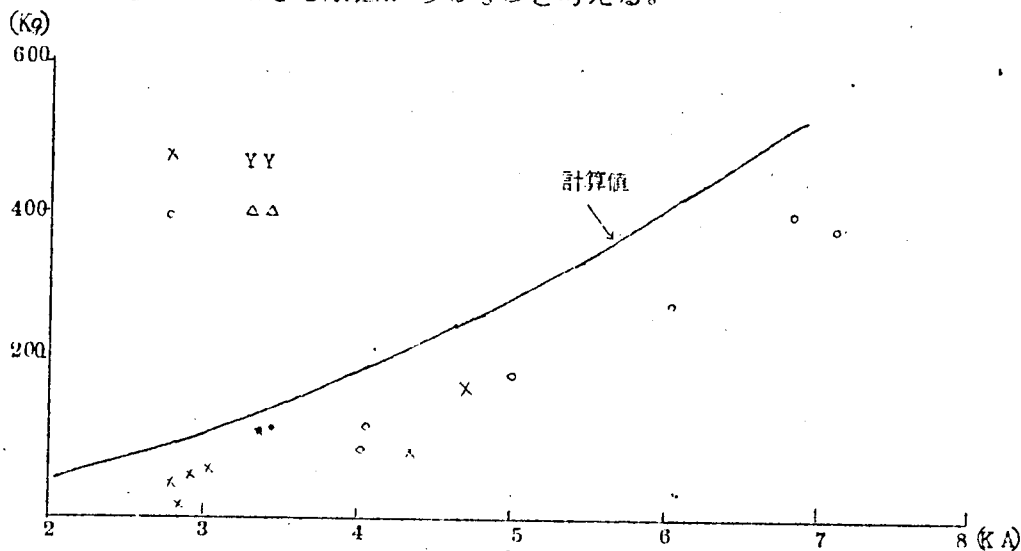
代表的波形を次図に示す。#3コイルの吊環の波形である。



第5.2-8図 垂直方向荷重

波形は電流波形の高調波分には追随でもないようである。コイルは多層より成っているので素線がお互いに電磁力によつて集合し、しかも合計したものの差が垂直方向電磁力として吊上バンドに力を伝えることになるので、応答特性が悪いのではないかと考える。また今回の測定は測定器の接地の具合が悪く通電時に尖つたパルス状のノイズが入っている。電流値と電磁力の

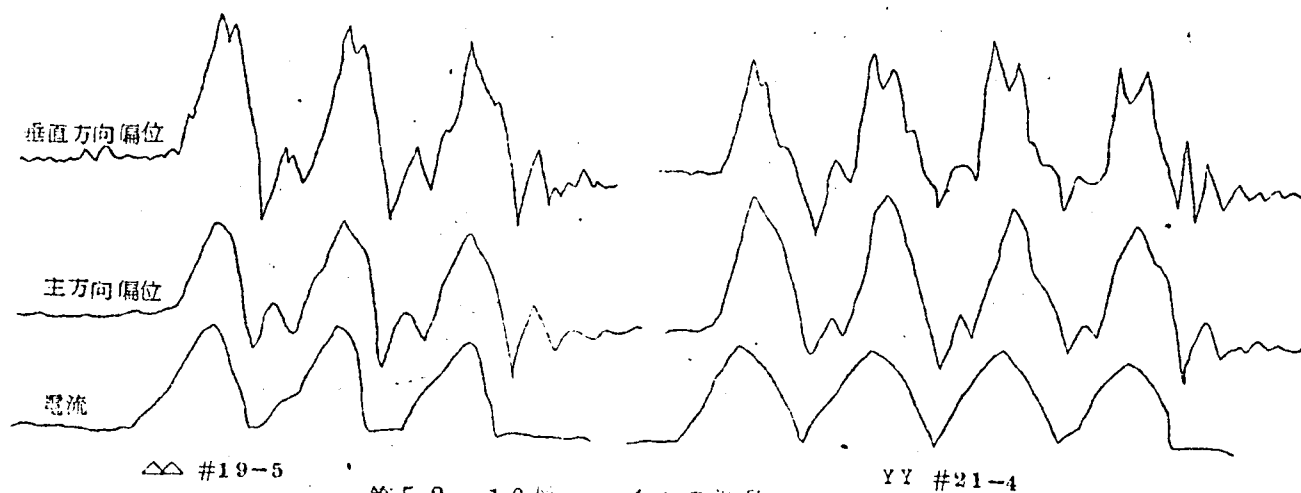
関係は大体推定値に近いが、低圧コイルに関しては推定精度は悪い。交流の場合も悪かつたことよりなにか思いおよぼさる原因があるものとする。



第 5.2 - 9 図 垂直方向電磁力—電流

#### 5.2.5 コイルの動き

短絡中のコイルの運動は変圧器底部において、#7 コイルは偏位計を用いて、また#5, 6, 7, 8, のコイルは高速度カメラによつて撮影を行なつたが、短絡電流が小さい範囲内では(50%)、次図のように電流に忠実な運動を行なっている。



第 5.2 - 10 図 コイルの運動

一枚一枚のコイルは機械的に考えれば一つの振動系を形成しており、上図の電流遮断後の振動より固有周波数を計算すると約 200 サイクルであるので、基本波が 60 サイクルである電磁力には忠実に応答することがわかる。

短絡電流が大きくなると、交流短絡の場合と同様、鉄心内におけるコイルの垂直方向の運動が現れ、コイルの運動は三次元的になり、電流が 0 になる近傍において、#7 コイルは電磁力の

方向とは逆に#6側に大きく入りこむようになる。

右図は直流側短絡終了後のコイル位置を示す写真であるが、試験前に一直線に並べて書いた十文字が、全体的に見て、高圧コイルが下り、低圧コイルが上に移動している。これは交流短絡の場合と反対方向であるが、磁気中心がほとんど一致している設計であるので、工作誤差が反対にでたものと解釈される。

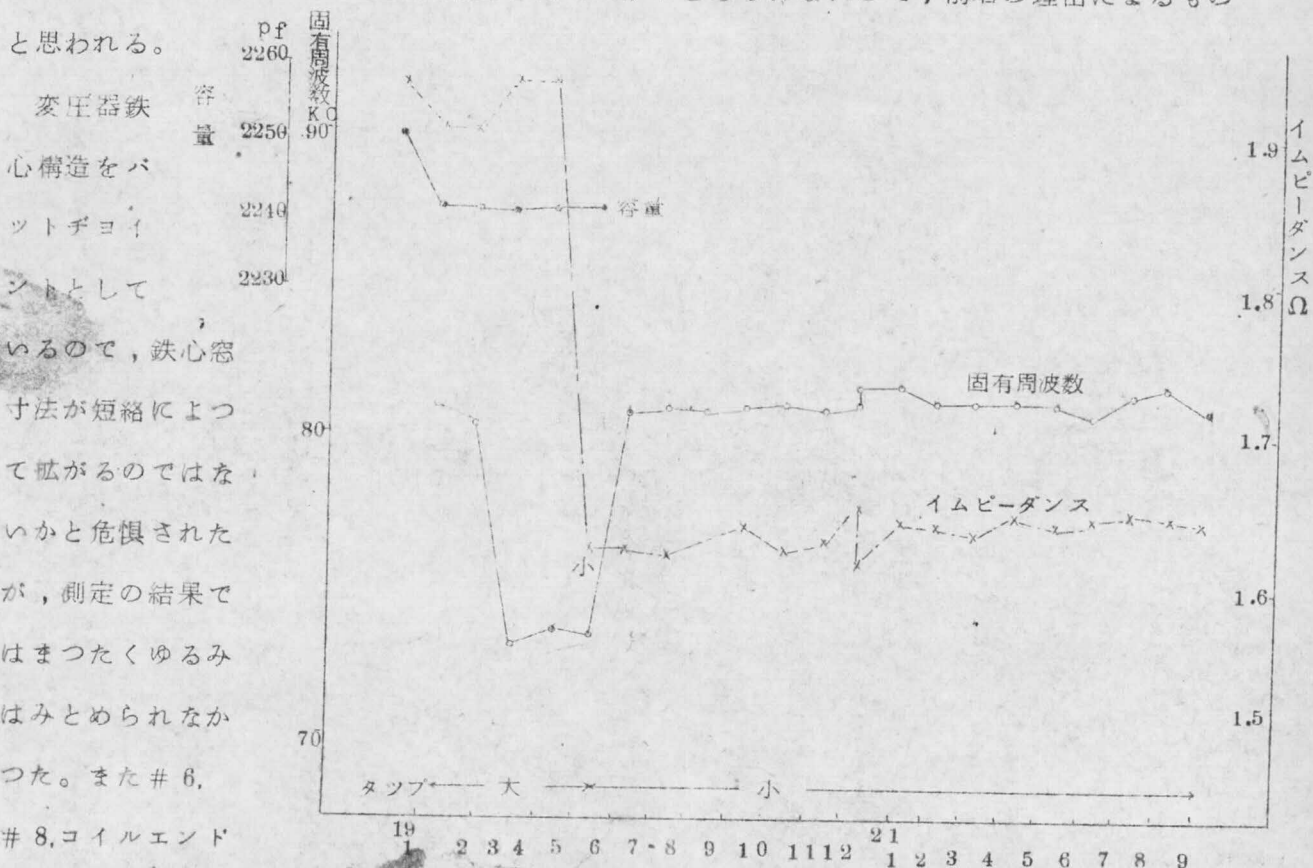


第5.2-11図 試験後コイル位置

なお#7コイルの主方向の最大振巾は7KAに於いて2mm程度であつて、交流短絡と変らず、木製楔は破損には至らなかつたが強度の弱いことを示している。

#### 5.2.6 その他

故障検出法は交流短絡と同様C, f, Z を併用したが、コイルの移動の激しかつた試験ケースには変化があらわれている。第5.2-12図は直流短絡全ケースにわたるC, f, Z の変化状況である。短絡電流のわりあい小さい範囲(50%)でも変化が認められるのは、変圧器の組立の差によるものか、直流側短絡特異な現象か理由は明確ではないが、オシロよりの判断では交流短絡と直流側短絡との間には現象上特異な差がみとめられないので、前者の理由によるもの



最外周の巻線の残留歪を測定したが  $1.00\mu$  以下で有効な情報はえられなかった。

### 5.3 結 言

1. 変圧器結線が Y Y,  $\Delta\Delta$  の三相全波回路で、ある相が転流直後から逆弧した場合、変圧器に流れる電流波形が明かとなった。
2. 交流短絡試験と同じ測定項目を定め、逆弧をおこなはせる方法として、整流器を逆並列に接続して点弧させ試験を行なったが、現象としては交流短絡とほとんど同様であつて、電磁力は推定値とよく一致した。変圧器の機械的固有周波数は 200 サイクル程度あり、電磁力の基本周波数よりも高かつたので応答が早く、コイルに発生する荷重、偏位などは電磁力に忠実に追従していた。
3. 整流器逆弧によつて流れる電流の中、その値が大きくて変圧器に危害を加えるものの波形はほとんど  $180^\circ$  持続する半波整流波形に近いので、交流短絡試験で等価な試験をおこなうには、直流分を一杯に含む波形で試験すれば、第一波がほとんど等価である。

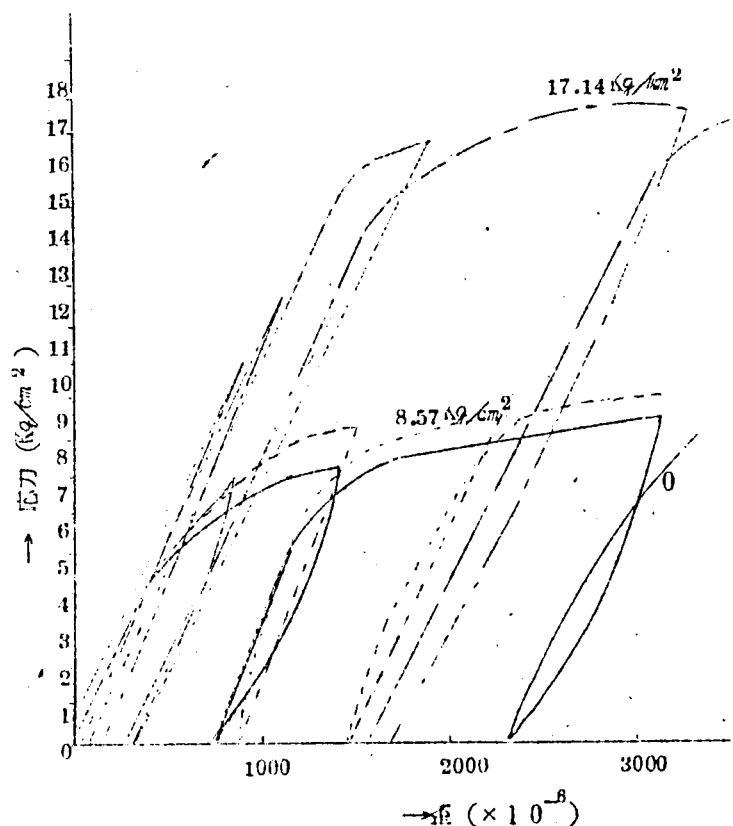
## 第6章 巻線構成材の機械的性質

変圧器の短絡強度を決定するものは、電磁力の大きさと使用材料の強度と考えられる。本章においては、短絡試験と平行して実施した、主として巻線関係の強度に関する検討結果について述べる。コイル群を構成する材料は紙と銅であるが、これらの素材はすべて購入品であつて、一応の受入規格に合格したものが使用されているが、短絡強度に必要な性質はかならずしも規格で押えられているとは限らないので、入荷の時期によって多少の差はでるかもしれない。検討にあたっては、その時点での入荷品の代表値をきめるべく、サンプルの数も考慮して決めたが、かゝる理由により、以下に述べるデータが現在および将来にわたって使用される全材料の代表値であると断言できぬ場合もある点をあらかじめ含んでおいていただきたい。

### 6.1 銅線の機械的性質

#### 6.1.1 静的な性質

コイルに使用される銅線の機械的な性質はバラツキも大きく、またこれに関する報告も少ない。これは焼鈍された銅はもっぱら導電体として利用されるのが主目的で、機械的強度を必要とする設計に使用される材料とはみなされていなかったために、研究され始めた歴史も浅く、また要求する部門がきわめて限られていたためであろう。CIGRE においても、1956年頃変圧器の短絡強度が問題となりはじめた当初は、銅の機械的性質がまづ取りあげられて論議されたが、1962年に至ってもまだ結



第6.1-1図 応力-歪特性



論はでていないようである。

銅線の機械的な性質は、加工硬化、不純分の含有量、その他の原因でいろいろに変化する。第61-1図はモデル変圧器に使用された $5 \times 3.5$ の平角銅線の応力-歪曲線で、初期応力（試験を実施する以前にかけた静的最大応力）を、 $0 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$ まで変えた場合の応力-歪曲線である。図より明らかなように応力の小さい間は、応力-歪間には直線的関係があるが、応力がある値をこすと比例関係はくずれ、急激に歪が増大する。初期応力を大きくすると比例限界は上昇する。これは一種の加工硬化をうけたためである。

第61-1図のように応力-歪曲線は非直線性を持つので、全体の性質を一つの数値で表現することは一般には不可能であるが、変圧器コイルの機械的性質を比較する場合には耐力を用いたほうがよい。耐力の定義はJIS Z2241によれば次式で与えられる。

$$\sigma_e = P_e / F_0$$

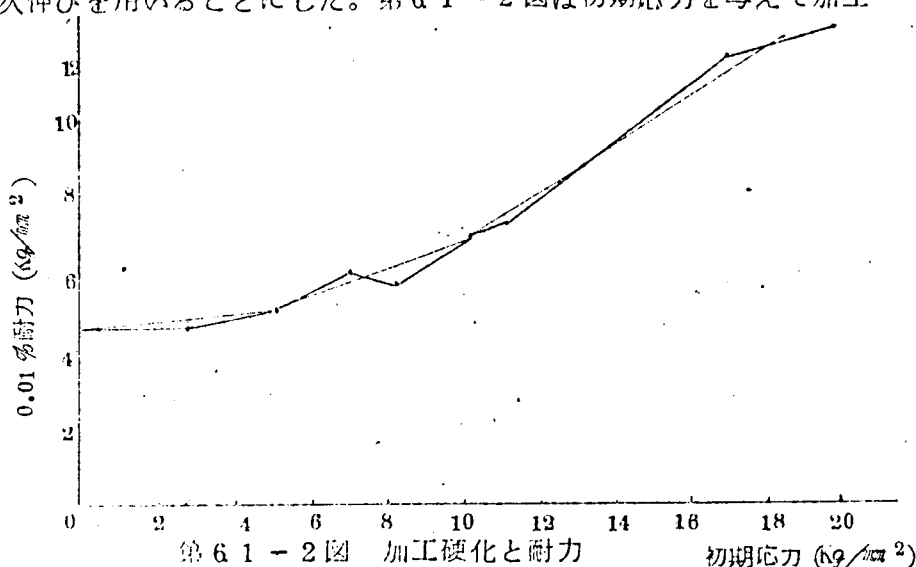
ここに  $\sigma_e$  : 耐力 ( $\text{kg/mm}^2$ )

$P_e$  : 伸び計を用いて荷重伸び線図を求め、伸び軸上規定の伸び ( $\epsilon$ ) に相当する点から試験初期の直線部分に平行線を引き、これが線図と交る点のしめる荷重 ( $\text{kg}$ )

$F_0$  : 原断面積

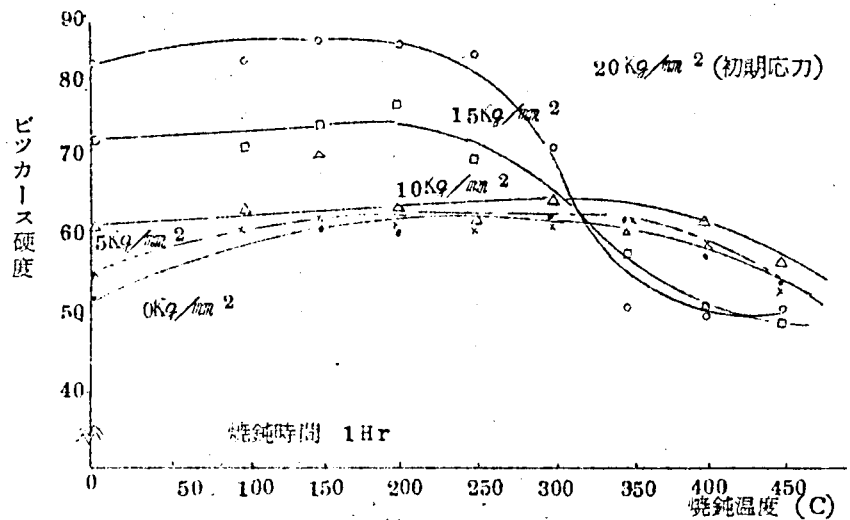
一般に鋼材には永久伸び0.2%の場合が用いられるが、銅線に対しても0.2%を用いるのは適当でないと考える。とくに繰り返し短絡の脅威にさらされる変圧器には不適當と思はれるので、筆者はかりに0.01%の永久伸びを用いることにした。第61-2図は初期応力を与えて加工硬化させた場合の耐力

(0.01%)の上昇具合を示すものである。この図は加工硬化を加えた銅線を使用すれば強度が増すことを示すものであるが、加工硬化は運転中の温度上昇、および短絡電流による温度上昇のために鈍

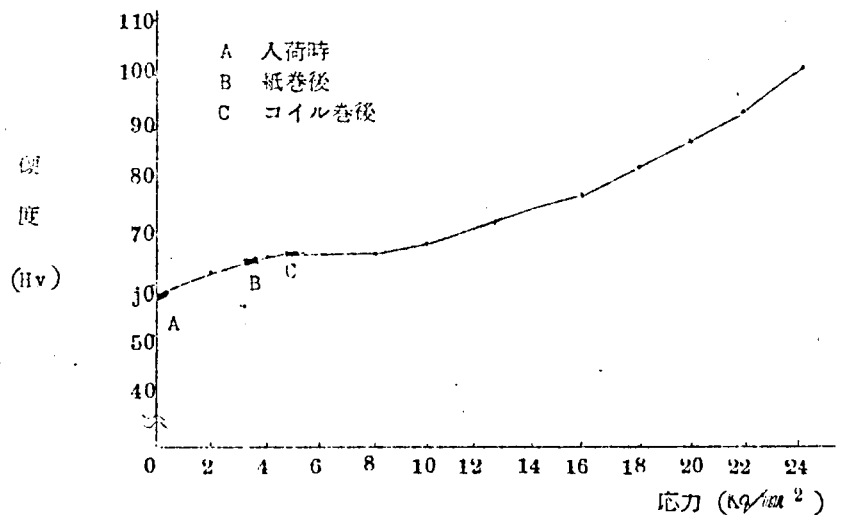


される可能性がある。100℃未満では再結晶による軟化はほとんど生じないものといわれているが、実用の変圧器で加工硬化による強度増強を期待してよいかどうかはCIGREにおいてもいろいろの意見が出されている。1962年には使用してよろしい、150℃で10年程度は加工硬

化は軟化しないということになっている。第61-3図は軟化と温度の関係を求めたものである。時間は1時間と割合短いので、このデータのみで10年の永きにわたって推定することは無理であるが、各国で行なっている実験データと比較して用いれば、加工硬化を利用するかどうかの判断の一助となるものと考え掲げた。このグラフは直接耐力を求めたのではなくて、硬度(Hv)と焼鈍温度との関係を求めている。硬度と0.01%耐力との関係は直接求めて



第61-3図 焼鈍時間と硬度

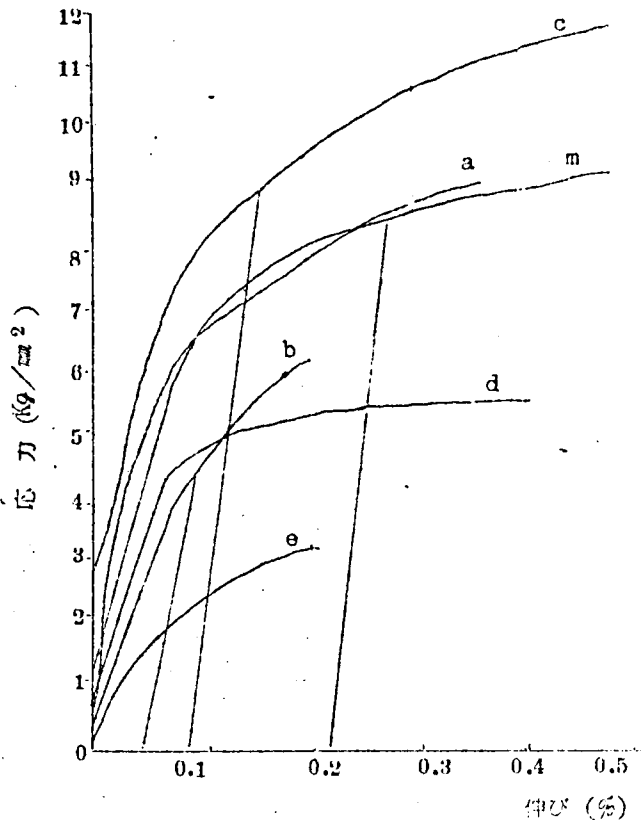


第61-4図 硬度-応力特性

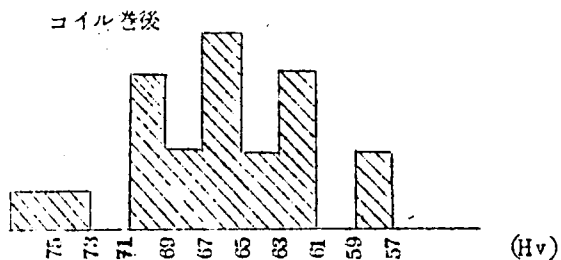
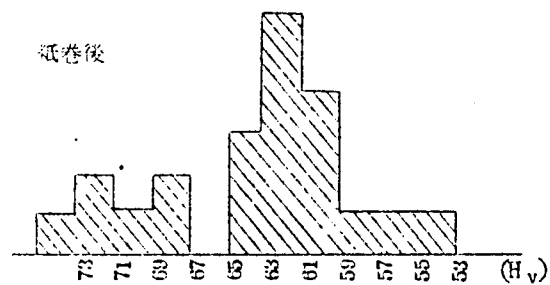
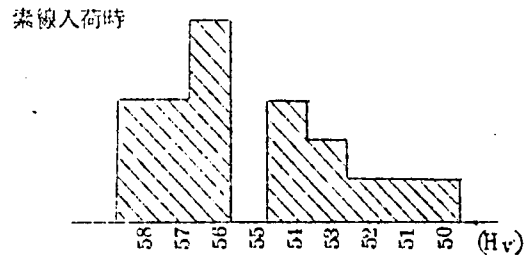
いないが、応力-硬度の関係が第61-4図のように求まっているので、間接的に耐力も求めることができる。ほかの文献<sup>(3)</sup>にもいわれているように、250°Cから急激に鈍し効果が現れることがわかる。加工硬化度の少ないものは、さらに高温の350°C程度まで鈍らないようである。

加工硬化の度合いを測定する簡便法として硬度(HV)を利用したが、硬度そのものはきわめてバラツキの多いものである。しかし、測定がわりあい簡単であり、また非破壊的であり、かつマイクロビッカースを使用すればきわめて小さい試料でも測定可能であるので、わりあい有効な手段である。第61-5図は銅線素材入荷時、紙巻後、コイル巻後の硬度のヒストグラムであるが、検定を行なえばあきらかに有意差がある。先述の応力-硬度グラフ(第61-4図)の上にプロットしてみると、入荷時をベースとして紙巻きで4  $\text{kg/mm}^2$ 、コイル巻後で5  $\text{kg/mm}^2$ 程度の引張りに相当する応力を受けていることがうかがえる。コイル巻き時の引張り応力は別途測定したところ5~6  $\text{kg/mm}^2$ でよい一致をみた。

第 6 1 - 6 図は、既発表の文献に記  
載された応力-歪特性を、同一グラ  
フに記入したものであるが、特性間  
に非常に大きな差が認められる。



第 6 1 - 6 図 既発表の特性



第 6 1 - 5 図 加工による硬度変化

a) Stenkvist, E. and Torseke, L.

What is Known about the Ability of Large Power Transformers to  
Withstand a Short Circuit? Comments On Existing Standards

CIGRE 1956, №106

b) Young, J.F. and Lambert, J.B.

Mechanical Performance of Metals

G. E. Review, 1943, 46 p.669

c) Knaack, W.

Mechanical Stressing of Transformers with Concentric Winding

CIGRE 1956, №135

d) Copper Development Association Typical Value

e) Smith, C.S. and Van Wagner, R.W.

The Tensile Properties of Some Copper Alloys Proceedings of the  
American Society for Testing Materials 1954.80. part3. p.131

m) 筆者の測定

今回測定した一連の試験は、電線メーカーより入荷する裸線のドラム巻きのものを、焼鈍することなくそのまま測定しているの、すでに相当程度の加工硬化を受けている。a) 曲線はいちど焼鈍したものを繰引きしたと説明あるので、多分同じような経歴を持つものではないかと推定している。

耐力を0.01%の永久歪（伸び）における値を取った点にいろいろ論議の余地のあるところである。機械的強度をうんぬんする場合は、動的荷重をかけたときの残留歪の量と、繰返し荷重をかけた場合どのようにこの残留歪が累積されていくか問題であって、静的荷重における耐力の値そのものにはさして重要な意味をもたないともいえる。この点に関しては6.1.3 動的性質の所で述べる。

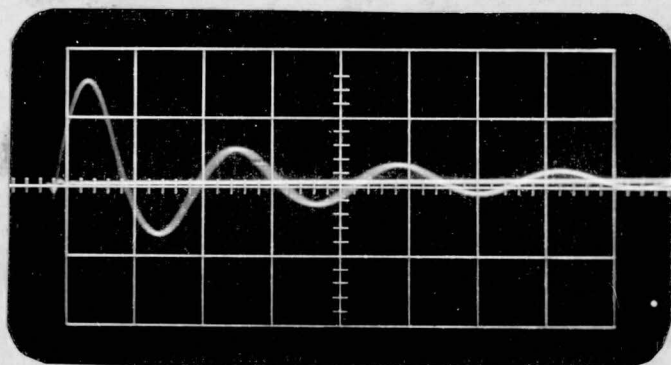
#### 6.1.2 動的荷重試験装置

変圧器コイルに機械的強度を要求されるのは、短絡時の動的な荷重がかかったときであるが、銅線が動的荷重に対してどのような性質を示すかという発表は、1962 CIGRE においてたゞいちど行なわれ<sup>(8)</sup>ただけで、データーは乏しめとばしい。Mr. L. TORSEKEは試験装置として二枚の平行導体に大電流を流し、その反作用力を利用する装置を使つて測定しているが、筆者は磁気遮断器の操作機構に使われている4"のマグネットを利用し、第6.1-7図の如き装置を作成した。4" マグネットは直流抵抗1.174Ω、インダクタンス9.0mH 程度のものである。磁気遮断器の操作機構としては、D.C 100V 85A で1.5 Ton 程度の力を発生できるが、交流で使用する場合にはAC 100V で343A しか流れず、相当の高電圧を印加する必要がある。コイルの絶縁は4000V程度までは大丈夫であるが、できるだけOne Shotの力であるほうが残留歪の累積の研究には便利であるので、コンデンサーの放電を利用することにした。第6.1-8図は回路図である。試料はモデル変圧器の高圧巻線に使用された5×35=175mm<sup>2</sup>を使用したか、充電電圧2000Vで、11Kg/mm<sup>2</sup>の応力を発生することができ、銅線の試験機としては充分の能力を持つ。最大出力は800Kg 程度である。電流波形は減衰の早い正弦波で、第6.1-9図に写真が示される。周波数は44Hzであつた。60Hzに合わせるためには充電用コンデンサーの容量を選べばよいのであるが、手持ち材料の関係で44Hzで試験を行なつた。

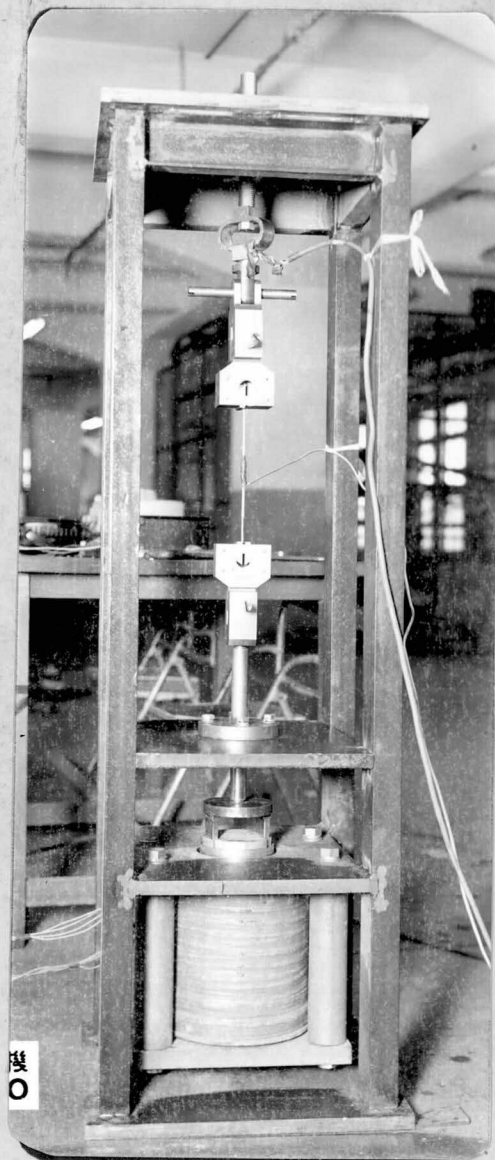
装置全体の更正，チェックは，SS41 の角棒を使用して行ない，弾性係数を求めたところ

$E=2.0 \times 10^4 \text{ Kg/mm}^2$  とまったく一致し，応力-歪曲線もループを作らないところから，良好な装置と判断した。（鋼材は静的，動的な特性の間に数KCまで差がないといわれている。）

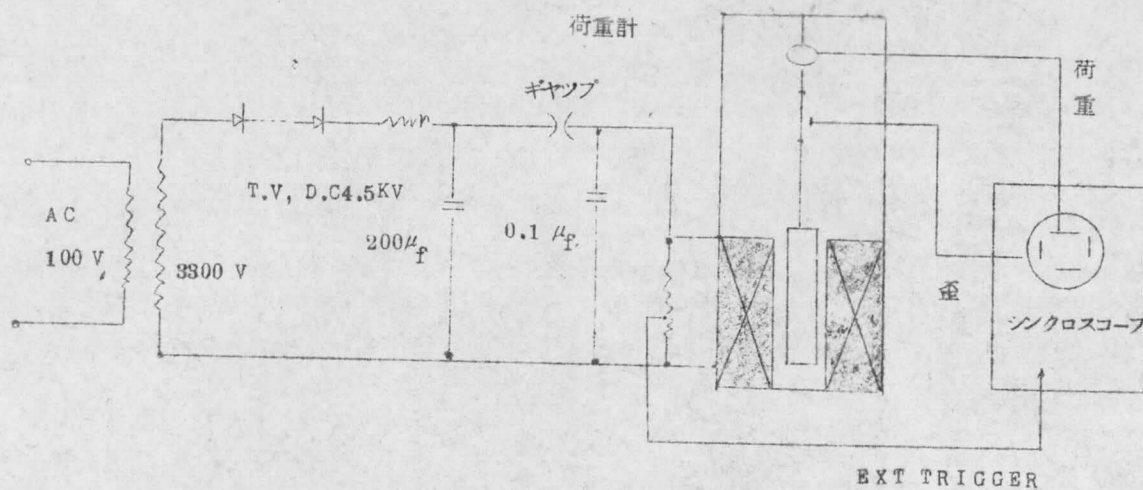
この装置はチャッキングを替えると，プレスボードの動的圧縮試験装置にもなるように設計してある。



第61-9図 電流波形



第61-7図 動的荷重試験器



第61-8図 回路図

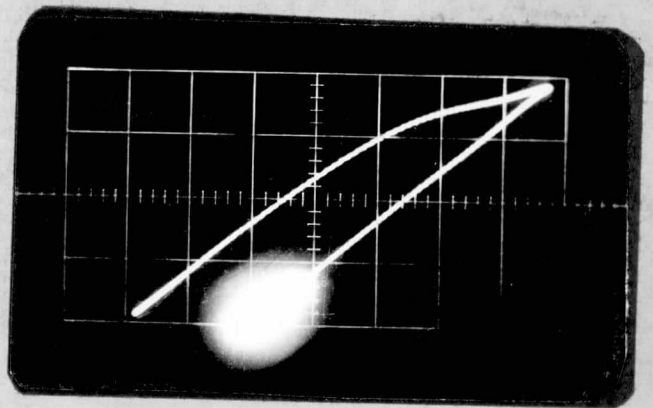
## 6.1.3 銅線の動的な性質

5×3.5平角銅線の5mm巾の両面にゲージ長さ2mm 60Ωのフイルゲージを接着して、動的荷重試験機で引張った。両面にゲージを貼つたのは曲げによる成分を相殺するためである。試験条件としては

初期荷重	0	5.0	8.57	17.13	Kg/mm <sup>2</sup>
最大動荷重	6.5	8.2	9.8	11.3	13.8 Kg/mm <sup>2</sup>

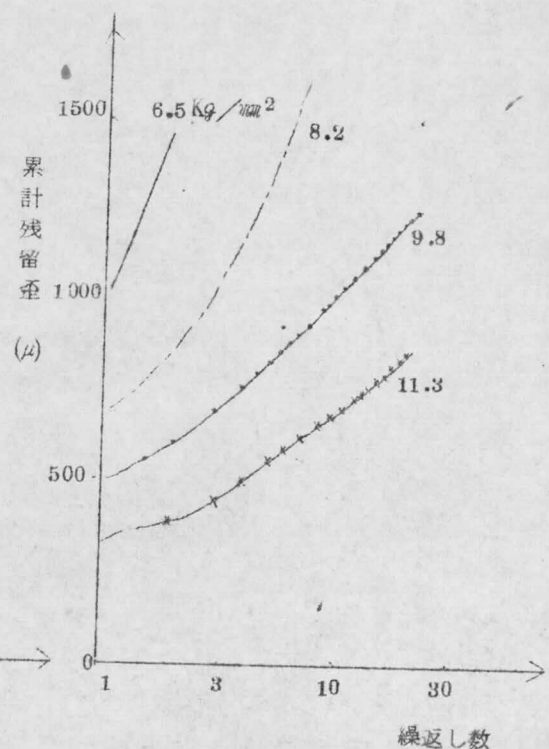
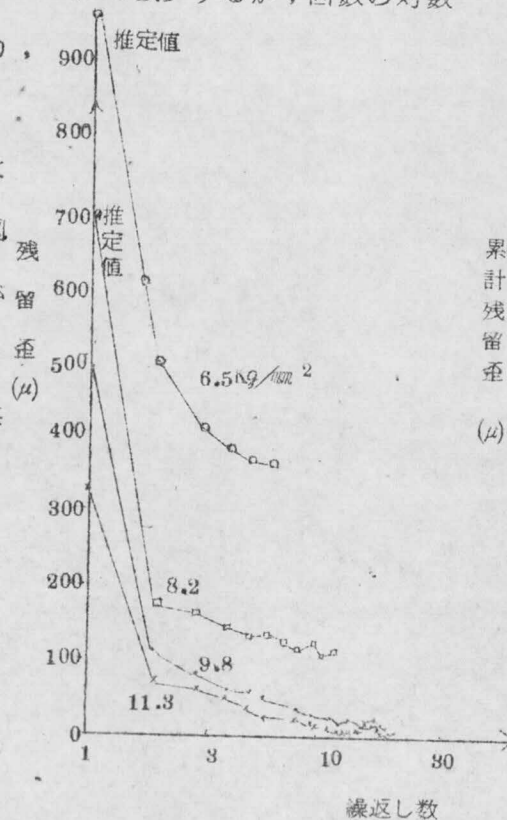
の組合せについて実施した。初期荷重とは、動的な荷重試験を行なうまえに、引張り試験機をもちいて加工硬化を加えるために引張った荷重のことである。

第61-11図は動的応力-歪曲線の一例で、初期荷重5 Kg/mm<sup>2</sup>のときのものである。電流は6.1.2項でものべたように44~の減衰正弦波であつて、減衰はわりあい急激であり、荷重は電流の2乗に比例するのでますます激しくなり第二波は第一波の1/3以下であつて単発荷重と考へても大きな誤りはない。応力-歪曲線は残留歪があるために上昇、下降は同一経路をとらず口を開く。残留歪は初回がもっとも大きく、回をかさねるにつれて減少するが、回数の対数を横軸にとり、



第61-11図 動的特性

一回毎の残留歪、および累積歪を图示したもののが第61-12図である。毎回の残留歪の大きさは初回目をのぞけば回数の対数と直線的関係にあり、累積残



第61-12図 繰返し回数と残留歪(初期荷重0)

留歪も Log (回数) とはほぼ直線関係にある。変圧器の機械的強度を問題にすると、コイルに関していえば、変形して絶縁距離が短くなるという点がもつとも重要な問題の一つであろうと考えられる。もちろん後述のように、コイルの運動、電流最大のときの弾性限内における撓み量に対しては大丈夫でなければならないが、それだけでは不十分で、累積される残留歪がコイルにタルミを生ぜしめ、機械的な Tightness を緩めることに対しても十分警戒すべきである。たとえば、1 年に 50 回短絡をおこすような回路にある変圧器とか、短絡試験設備用変圧器のように、きわめて多数回の短絡の脅威にさらされる変圧器は、一回の短絡によつて生ずる残留歪は、きわめて小さな値に留るように設計しなければならない。一年 50 回短絡を受ける変圧器を 20 年間無事故に運転したいような場合、銅線の伸びだけに限つて考え、伸び 0.2 % 迄は許されるとすると、初期応力 0 の銅線を使つて、 $82 \text{ Kg/mm}^2$  の最大応力までは許されることになる (安全率 1 として)。初期荷重を増加していくと同一動荷重に対する残留歪は減少するが、 $5 \text{ Kg/mm}^2$  程度ではほとんど差はなく、 $857 \text{ Kg/mm}^2$  においては、 $1/3$  程度に減少し、 $1713 \text{ Kg/mm}^2$  の初期荷重をかけたものは残留歪をぜんぜん生じない。これは初期荷重以下の動荷重であるから当然のことである。焼鈍の効果も  $10 \text{ Kg/mm}^2$  以下ではあまりあらわれないようなので、この程度の加工硬化をあたえておくことは有効な手段とも考えられる。

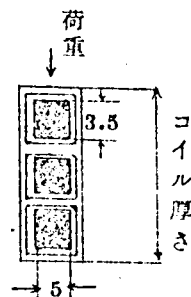
同一初期荷重 (加工硬化) を受けた銅線に、静的荷重と動的荷重をかけた場合の、応力-歪特性の比較をすると動荷重に対する特性のほうが比例域が伸びている。動的荷重  $82 \text{ Kg/mm}^2$  による初回の残留歪は  $500 \times 10^{-6}$  であるのに比し、同じ荷重を静的に加えた場合には、 $1600 \times 10^{-6}$  残留歪が発生することからも、動的荷重に対する強度は強くなることがわかる。

## 6.2 銅線束の機械的性質

変圧器巻線は普通多層 (2, 3, 4) よりなっている。銅線の一本一本の特性は静的、動的ともに明らかとなったのであるが、束にしたときどのような性質を持つものであるか、こんど調べんとするものである。変圧器コイルとして組み上つた銅線は、単純引張り荷重を受ける場合はまれである。とくに外鉄形変圧器では、主方向電磁力は、カルタによつて両端を拘束された梁に垂直に働く荷重となるのであるが、並列導体は荷重の方向と同一方向に重なっているために、断面係数は一本の場合より増加していることは想像されるが、はたして何倍に増加しているかを求める必要がある。導体は絶縁紙が巻かれており、絶縁紙は金属のような直線的性質を持たないので、銅線束の性質はきわめて複雑な性質を持つであろうと想像される。

### 6 2 1 集中荷重に対する性質

標準工作のもとに作成された2, 3, 4層の巻線1ターン(銅線束)を30cm程度サンプリングし, また一層のものは裸のまま紙巻き前のものを試料とした。導体絶縁方法は,  $8H(2+2+A)0.76$  である。すなわち1本1本の素線に0.08mmの絶縁紙を2層巻き, 並列導体の本数を重ねてその上に0.08mm絶縁紙を2層巻き, さらにその上に0.08mmの接着紙を巻いたものである。導体は3.5×5の5mmの辺が重ねてある。



第62-1図 コイルの1ターン

多層の影響を知るもつとも簡単な方法は, 集中荷重をかけた場合に各層がどれだけ撓み, また各層にどれだけの歪が現われるかを調べればよい。そこでCクランパーで銅線束の両端をかねて固定し, 中央にアムスラー試験機で荷重をかけた。歪の測定は両端より $40/60$ の所に5mmゲージを, 梁の裏表に貼つて行なった。梁の固定端は32t プレスボードをかいして締付けたが, これは実物変圧器のカルタ間スパンに似せるためである。

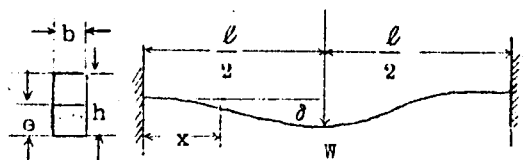
両端固定の梁に対する公式は機械工学便覧覧によればつぎのとおりである。ただし記号は第62-2図に記したとおりとする。

$$M = \frac{W\ell}{2} \left( -\frac{1}{4} - \frac{x}{\ell} \right)$$

$$\delta_{x=\frac{\ell}{2}} = -\frac{W\ell^3}{192EI} = -\frac{\sigma\ell^2}{24Ee}$$

$$\sigma = \frac{M}{Z}$$

$$Z = \frac{1}{6}bh^2$$



第62-2図 両端固定梁

..... (62-1)

$$E = 1,000,000 \text{ Kg/cm}^2 \sim 1,250,000 \text{ Kg/cm}^2$$

(62-1) 式の示すところは, もし多層の梁の断面二次モーメントは断面の形状で決るものと解釈すると, 2層の場合は $1/2^2 = 1/4$ , 3層の場合には $1/9$ に応力は減少することになるが, 実験結果はそうになつていない。たとえば非直線性のあまり現われない範囲で比較してみても

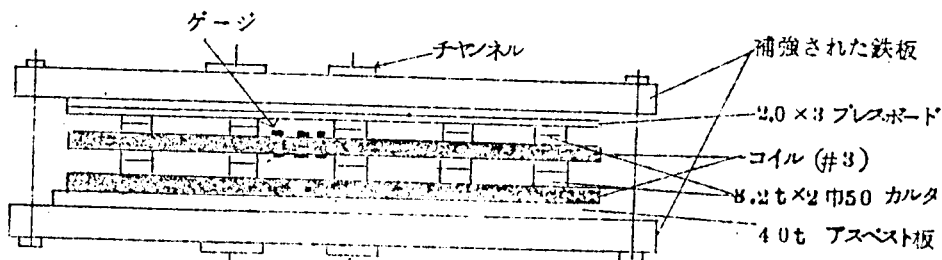
本数	荷重(Kg)	印加側歪( $\mu$ )	裏側歪( $\mu$ )
1	5	534	520
2	10	550	340
3	15	530	270



となり、歪の大きい方の印加側で比較してみた場合、多層梁の強さは、1本の場合の $n$ 本倍になっていることがわかる。すなわち多層梁の等価断面二次モーメントを仮想するならば、それは1本の断面二次モーメントの層数倍に等しい、といえる。なぜこのようになるかといえば、多層梁は単独梁と異なり、層と層との間で滑ることができるためである。またもしも層と層との間に絶縁紙のような物質が介在しないならば、各素線の裏表に現われる応力は、符号が反対で等量であるはずであるが、コイル導体の場合は絶縁紙があるために下の層程応力は小さくなっている。最上層部に加えられた荷重は第一層に撓みを与え、第一層、二層間に存在する絶縁紙の荷重—撓み特性によって決定される荷重が二層目の銅線に伝えられ二層目が撓む、と解釈されるので、絶縁紙が柔い特性であると、第一層目は相当撓まないと第二層目には力は伝わらないことになる。実験の結果では、二層の場合で60%しか二層目に伝わっていない。

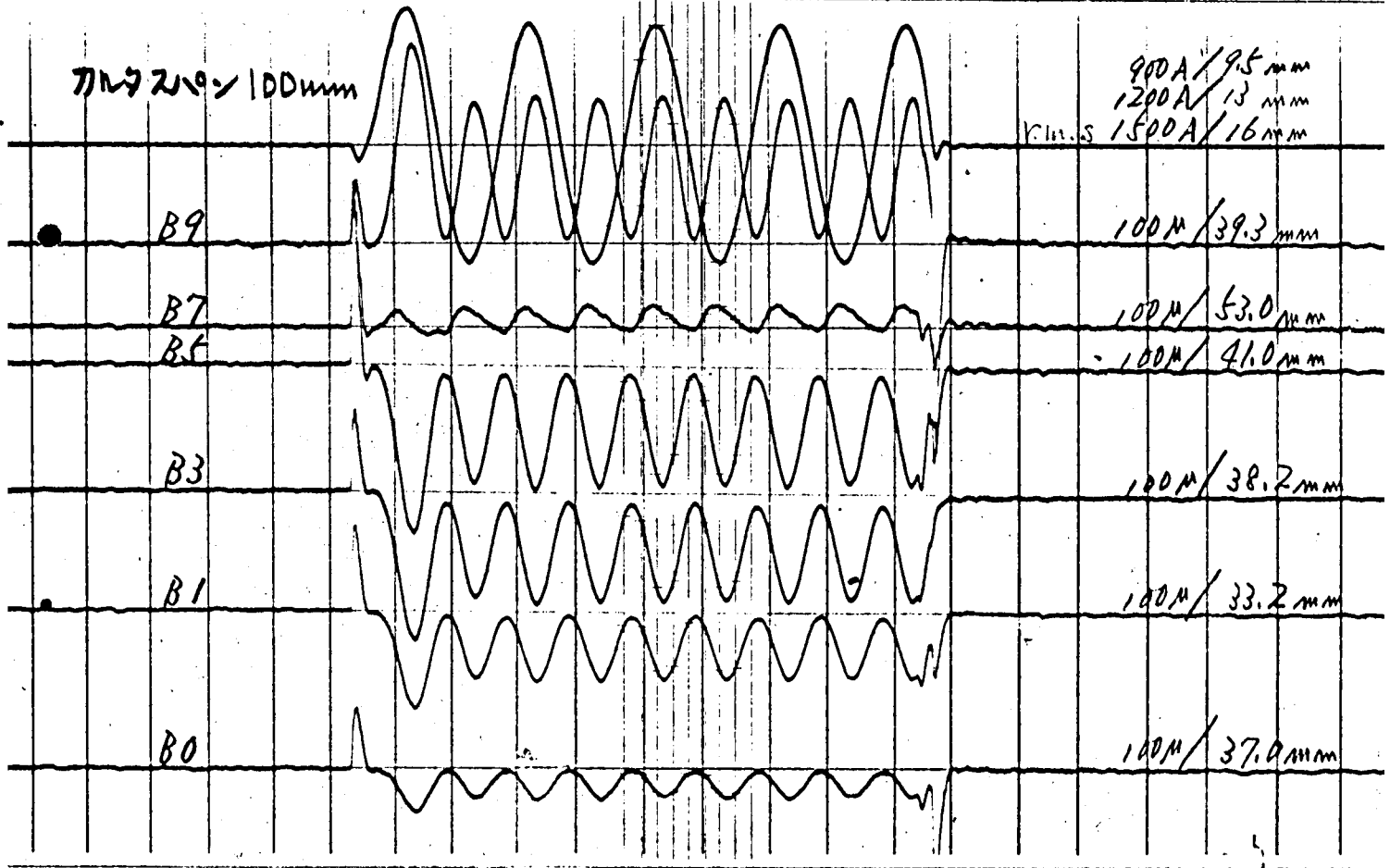
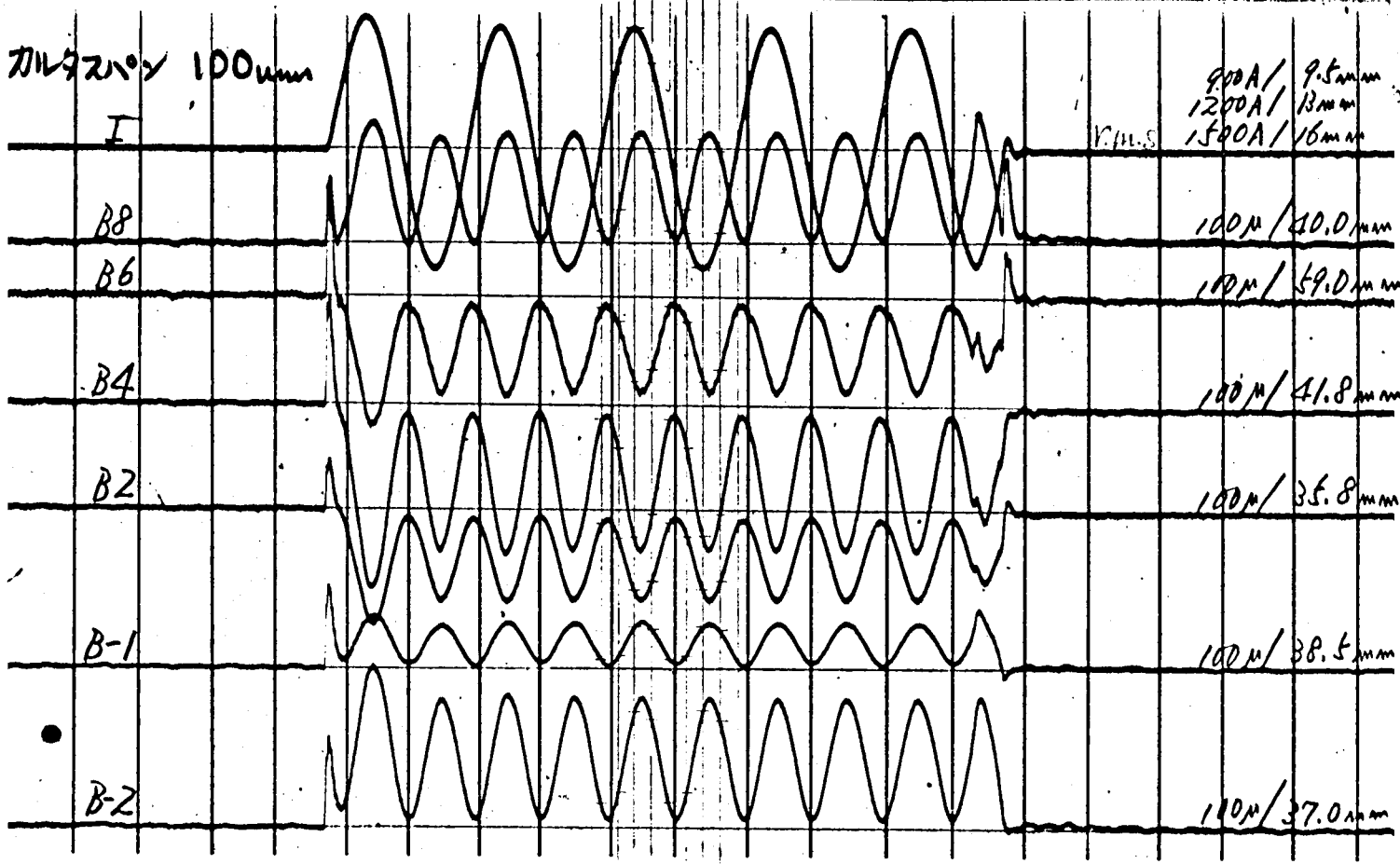
#### 6.2.2 分布荷重に対する性質（カルタピッチの決定）

短絡時に銅線束にかかる荷重は、主方向電磁力による分布荷重である。集中荷重による特性は明らかとなり、多層の梁として考えたときには断面係数として、各素線が並列に並んだときのものをもちいれば安全側にあることがわかったが、この結論が分布荷重の場合にはどうであるかを調べることにする。モデルトランスの短絡試験では、高低圧コイルの対向するところの素線は電磁力に耐えることができず彎曲していたが、短絡試験時に現われる歪は測定していなかった。これはモデルトランスとはいえ印加する電圧は6KV級で、絶縁の関係上他の現象と同時測定は不能であったためである。もしほかの要素との同時測定を行わず、または導体素線の歪専用の歪計、電磁オシロを準備すれば、短絡時における測定を行なうことは不可能ではないが、大きな電源を必要とする完成品トランスで、小細工を必要とするこれらの測定を行なうことは不経済であるので、手軽に行なえる実験法として二枚のコイルによる短絡を実施した。



第62-3図 二枚のコイルの短絡

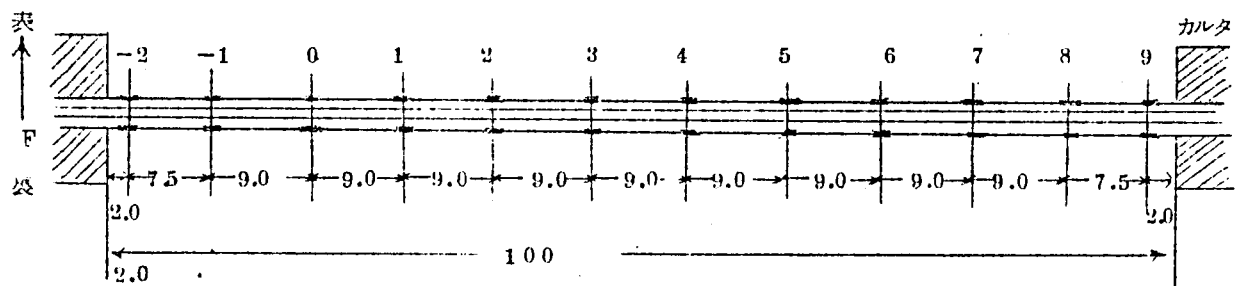
上図は試験装置の説明図である。モデルトランスの製作と同時に作られた#3高圧コイルを2



枚逆接続に結線し、コイル両面にはモデルトランスに使用したと同じ巾50、厚さ3.2×2のカルタを敷き、補強された鉄板の4隅と中央を締付けた。ゲージはコイルの長手直線部の中央に2mmゲージを9mm間隔で表裏に貼りつけた。試験はカルタ間隔を50、100mmの二ケースについて実施した。

第7章でのべる電子計算機および第3章でのべた抵抗紙模倣法によつて求めたところ短絡電流1000Aとして11.1Kg/M/1Tであった。

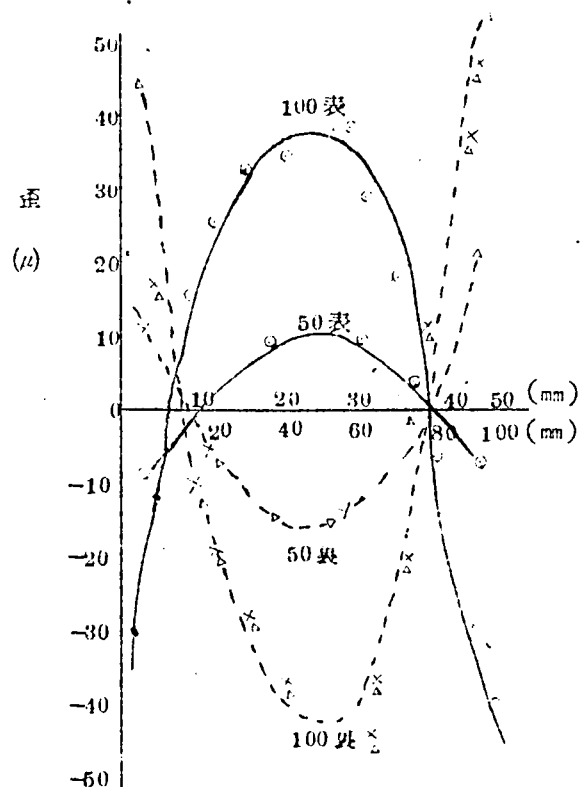
第62-4図はカルタスパン100mmのときのオシロであり、ゲージの貼付位置は下図に示すとおりである。



第62-5図 ゲージ貼付位置(100mmの場合)

短絡電流は、投入瞬時の直流分が激衰し切つた状態で、交流波高値で2200Aである。歪の波形はほとんど完全な120°の正弦波で、電流の2乗との位相差はほとんど認められない。歪が最大になるときは電流が最大値になる90°及び270°の時であるが、同じ時刻における歪をグラフに示したものが第62-6図である。この図を見て感ぜられることは、カルタスパン間の導体は両端固定の梁として働いているらしいということである。両端固定の長さ $\ell$ の梁に $w$  Kg/cmの分布荷重がかゝつたとき、固定点より $x$ なる位置における曲げモーメントは

$$M = \frac{w\ell^2}{2} \left( \frac{1}{6} - \frac{x}{\ell} + \frac{x^2}{\ell^2} \right)$$



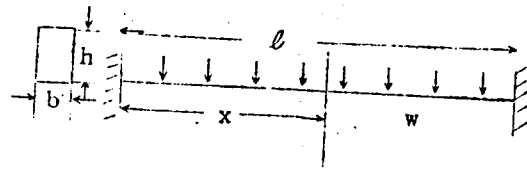
第62-6図 カルタスパン間導体の歪

$$M_{x=\frac{\ell}{2}} = -\frac{w\ell^2}{24}$$

$$M_{\max} = M_{x=0} = \frac{w\ell^2}{12}$$

中央における応力は

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} = \frac{\frac{w\ell^2}{24} \cdot \frac{h}{2}}{\frac{1}{12}bh^3} = \frac{w\ell^2}{4bh^2}$$



第62-7図

..... (62-2)

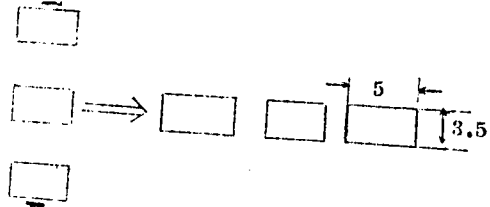
銅のヤング率を  $1.25 \times 10^{10} \text{ kg/cm}^2$  とし、また集中荷重においてえられた結論と同じように、多層の梁の断面二次モーメントは縦に重ねた断面を取らず並列に列んだ場合の断面二次モーメントを用いて梁の裏面に貼ったゲージに現われる

歪量を求めると、短絡電流  $2000 \text{ A}$  の時計算

値は  $\epsilon = 51 \mu$  となる。他方実測結果による

と表では  $38 \mu$  裏面  $45 \mu$  である。裏／表の

比率は平均  $1.2$  で裏面の歪のほうが大きい。



第62-8図 等価断面係数

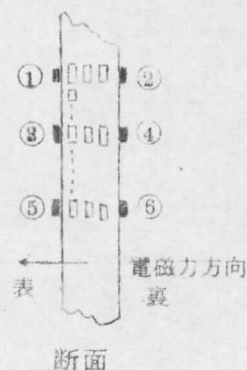
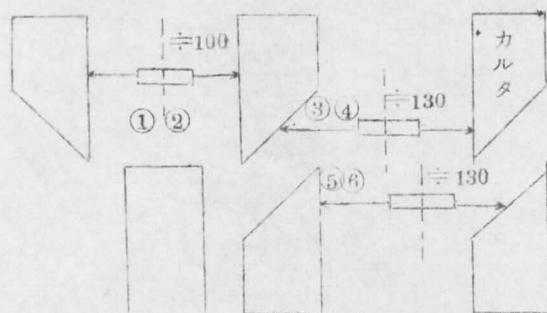
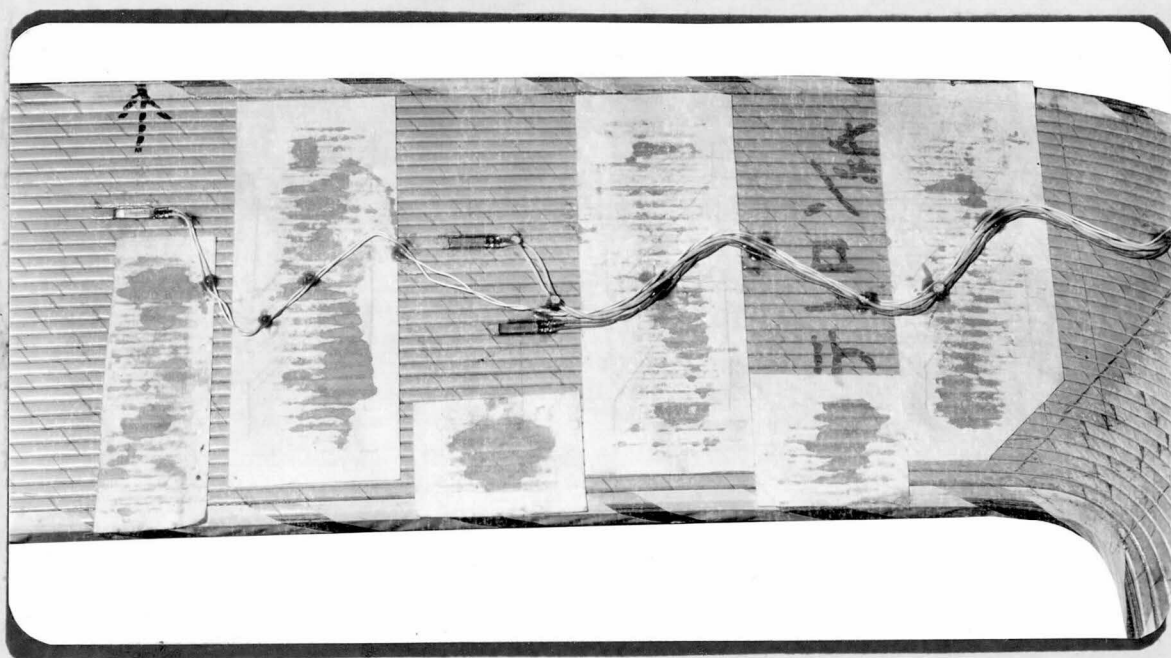
これは素線間に介在する絶縁紙の影響と考えられる。理論計算との比較では、裏面の値と比較した場合理論値の方が  $1.14$  倍大きい。すなわち多層の断面係数は一本一本が並列に並んだと考えた断面係数よりも  $14\%$  ほど大きいことがわかった。ゆえに並列に並んだ等価断面係数を考えれば多層梁の中央部に現われる歪に対しては安全側である。

両端固定の梁に分布荷重が働いた場合、最大荷重は (62-1) 式の示すように固定端において現われその大きさは中央部の  $2$  倍であるが、実験の結果でははるかに小さく  $130\%$  程度であった。これは電流最大値における場合だけではなく、あらゆる位相においても  $130\%$  以下であることよりみて、変圧器コイルの素線のようにカルタによって締付けられている梁は、両端固定の梁とは多少異った性質を持つことがうかがえる。しかし両端固定を考えることは安全側であるので設計に余裕のある場合はこのように考えて計算することが望ましい。なぜ両端固定の場合よりも固定端における歪が小さいかという理由は明かでないが、カルタの角の、部分的な破壊によるまるみの発生によつて応力集中が防がれているためではないかと推定される。

発生電磁力が過大な場合、応力を小さくする方法としては (62-2) 式より明かるように梁の長さを短くするか、断面の高さを高くするのがもっとも有効であるが、断面積を大きくすることは渦流損の点より不可能な場合がある。カルタピッチを小さくすれば長さの  $2$  乗に反比例して応力が小さくなると理論式は教えるが、実証するためにカルタピッチ  $50$  の場合も試験

したところ、結果は表で4倍、裏面では3.2倍では理論値に近い。

以上の検討は電源のつごうで、わりあい小さい電磁力の範囲の等価試験であるが、実物の変圧器ではしからばどうなっているか検討したので以下にのべる。この試験は第8章でのべる改造後のモデルトランスの交流短絡試験時に実施したものであって、先にのべた交流短絡試験に用いたトランスとの違いは、大電流になってもコイルの運動にいわゆるハンマリングが少ないように改造されたものである。短絡電流が流れている期間中の測定ができれば申しぶんないが、コイル素線に直接貼りつけられた抵抗線ゲージを、他のエレメントと同じ測定器で測ることはできないので、残留歪を短絡後に求めて、逆に短絡時に遭遇した最大応力を求めることとした。ゲージは第6.2-9図に示すように、#6コイルのカルタピッチ中央に3箇所、裏面と共に計6枚貼り、リードは接着剤でコイルに貼りつけながら油ダクトを通してコイルエンドまで導いた。



第6.2-9図 ゲージ貼付説明図

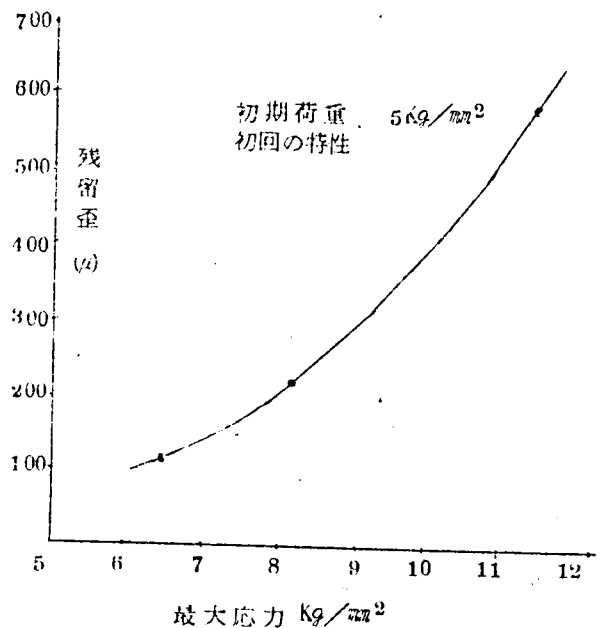
短絡電流の最大値 4470 A で短絡したのちの残留歪は、次表の第 2 項に示すとおりである。

第 6.2-1 表

ゲージ番号	残留歪	最大応力推定	電磁力より推定	梁/表
1	+102 $\mu$	+6.3 $\text{Kg/mm}^2$	-6.84 $\text{Kg/mm}^2$	1.11
2	-138	-7.0		
3	+345	+9.6		
4	-725	-12.1	-11.6	1.26
5	+245	+8.6	-11.6	1.25
6	-505	-10.8		

残留歪より最大応力の推定を行なうには、6.1.3 項の銅線の動的性質のところ求めた繰返し回数と残留歪の関係を利用し、初回の応力-残留歪特性を書きなおすと右図が求まる。この特性を利用して最大応力を推定したのが、上の表の第 3 項である。

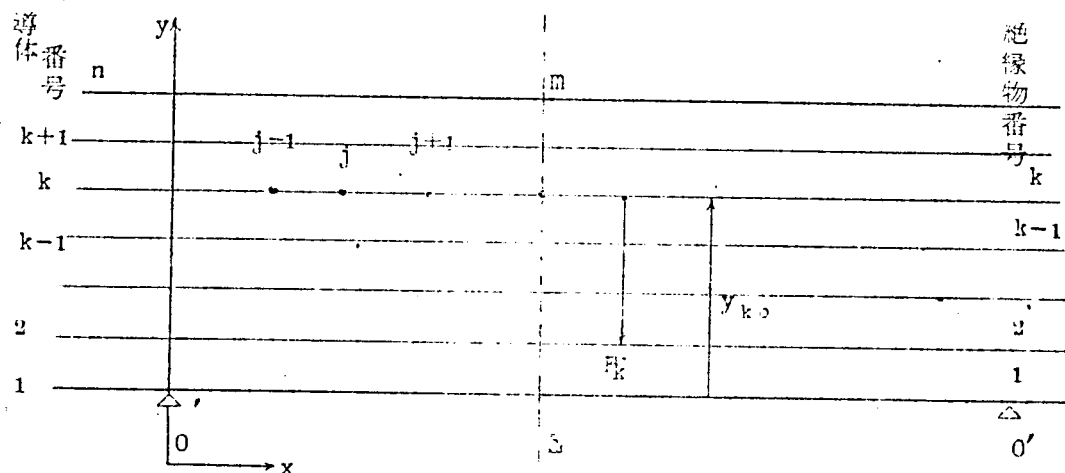
他方、鉄心内 #6 コイルのゲージ貼付け位置における電磁力は、第 3 章、6.1 より、 $266\text{g}/\text{M}/100\text{A}$  であるので、4470 A に換算し、さらに等価断面係数を考えて (6.2-2) 式より推定を行なったが第 4 項で、よい一致をみる。導体の最、表に現われる荷重の比も、二枚のコイルにおける実験と同程度の比がえられた。



第 6.2-10 図 応力-残留歪特性

### 6.2.3 多層梁の理論的解析

実験的事実をもとにして、カルタスパンに支えられる多層梁で現われる応力の計算は、等価断面係数の概念を導入することによって可能であることが前項でのべられたが、これを理論的に取り扱うことにする。



第62-11図 多層梁

梁は上図のように0, 0'点二点で固定されているものとする。また多層梁は導体と絶縁紙より構成されているが、導体は非圧縮性であるので厚みは省略し、断面二次モーメントIのみが存在する線と考える。

各層に外力 $F_x$ が働くまえの、基準線からの距離を $y_0(k, j)$ とし、外力が働いて撓んだ後の距離を $y(k, j)$ とすると、静的平衡条件よりつぎの式が成立する。

$$EI \frac{d^4 y_k}{dx^4} + K(y_{k+1} - y_k) - K(y_k - y_{k-1}) + F_k = 0 \quad \dots\dots\dots (62-3)$$

但し E : 導体材料のヤング率

K : 絶縁紙のスプリング定数で非直線性函数

又層と層との間の平衡の条件として、(k+1)層~n層迄の導体に働いた外力の総和は、k層目の絶縁紙の受ける総圧縮力に等しい。

$$\sum_{k=k+1}^n \sum_{j=1}^m F(k, j) = \sum_{j=1}^m STIF \left( 1 - \frac{y(k+1) - y(k)}{y_0(k+1) - y_0(k)} \right)_j \quad \dots\dots\dots (62-4)$$

こゝにSTIFなる函数は絶縁紙の荷重-撓み特性である。

以上の2式を連立させて解けば良い。

境界条件として梁の端部(j=1)において導体1の下には絶縁紙は無い

$$y(1, 1) = 0$$

$$\frac{dy}{dx}(k, 1) = 0 \quad \text{撓み角} = 0, \quad \dots\dots\dots (62-5)$$

梁の中央(j=m)において

$$\frac{dy}{dx}(k, m) = 0 \quad \text{撓み角} = 0 \quad \dots\dots\dots (62-6)$$

$$\frac{d^3 y}{dx^3}(k, m) = 0 \quad \text{剪断力} = 0 \quad \dots\dots\dots (62-7)$$

以上の式は理論解を求めることは不可能であるので計算機を用いて解くことを計画中である。

### 6.3 矩形コイルの機械的性質

外鉄形変圧器のコイルは所謂矩形コイルであつて、内鉄形変圧器のように円形でないために理論的取り扱いがきわめて困難で、過去の文献を探しても発表された物は皆無である。変圧器に働く電磁力はいままでに詳しく論じてきたように、主方向成分と垂直方向成分の2つが存在し、主方向成分は6.2節で検討したカルタビッチ間の多層梁の分布荷重の問題となり、垂直方向成分電磁力は矩形の多層巻きコイルの機械的強度を要求することとなる。今回の1000KVAモデル変圧器の試験では、垂直方向電磁力によるコイルの変形という現象は発生しなかつたが関西電力と共同研究した2000KVA変圧器の短絡試験ではこの原因で変圧器は破壊した。垂直方向電磁力がコイルの強度よりも大きいと下図に示すように、矩形コイルのコイルエンド部が外側に彎曲し、コイル内アテとコイル内周との間が大きく口を開けるようになり、最悪の場合はこの附近から絶縁破壊を惹起することがある。この節では種々の方法による実験データと、理論的検討を対比させ矩形コイルの機械的性質を明かにせんとするものである。

#### 6.3.1 集中荷重に対する性質（直線梁としての考察）

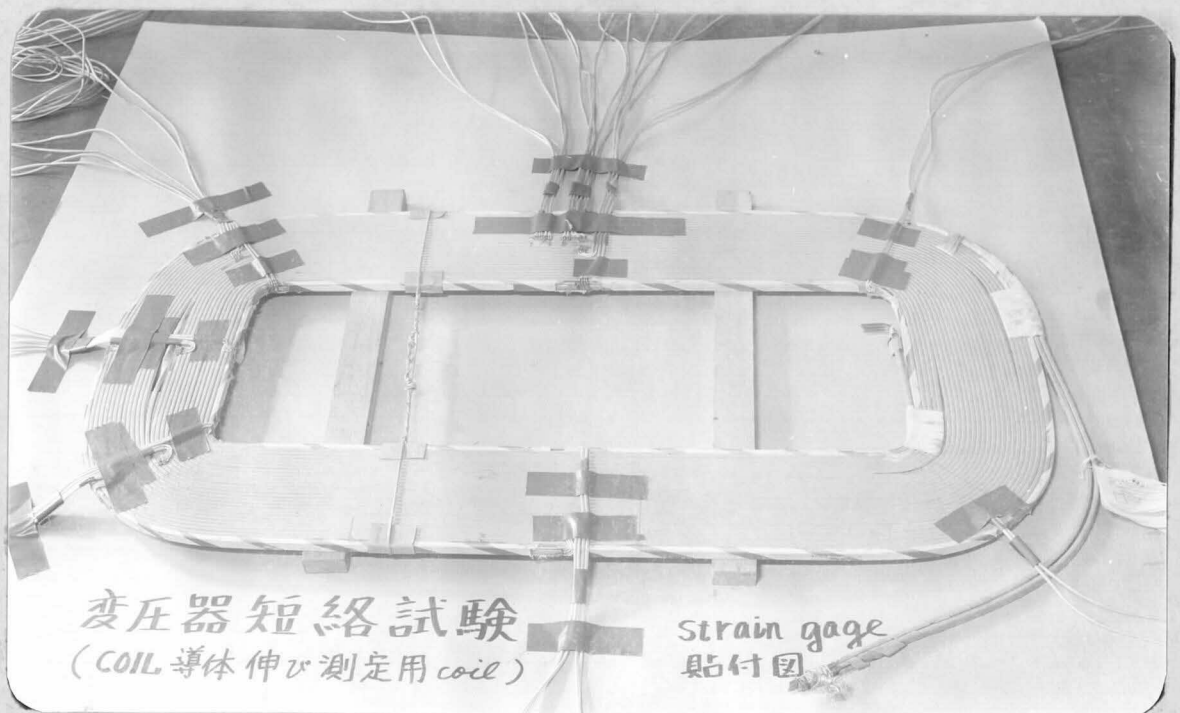
矩形コイルの機械的性質をあきらかにするために、まづ集中荷重による試験を実施した。矩形コイルは形状が計算に乗りにくい矩形であるほかに、多層の銅線よりなっており、しかも各素線は絶縁紙という非直線的性質の物質で巻かれているために、ますます



第6.3-1図 垂直電磁力によるコイルの変形

複雑な特性を持つものと予測される。第6.3-2図は試験に使用した#3コイルに、抵抗線歪

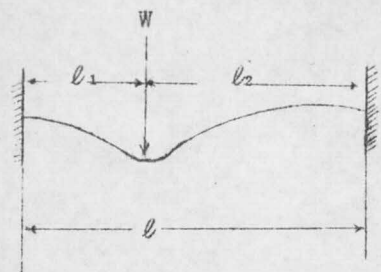




第 6.3 - 2 図 ゲージ貼付図

計を貼付けた状況を示す写真である。荷重は矩形の長短各辺の中央で引張った場合と、二点荷重で引張った場合の組合せ 4 ケースについて行なった。引張り荷重は短絡試験時に使用した垂直方向荷重計を利用し、また引張るためのバンドも先の試験に用いた吊上げバンドを流用した。試験結果を検討してみると、最大応力の現れるのはコイル内周 4 隅であることがわかったので、この点の歪を対象にして考察することとする。(荷重印加点の下ゲージは極部的な荷重を受けているものとして除いて考えることとする。)

もつとも単純な考えかたとしては、矩形コイルを 4 隅で固定された 4 本の梁からなるものと考え、多層からなる梁の等価断面係数を適当に選ぶことによつて、固定端に現われる歪の量と、矩形コイルの 4 隅に現れる歪とが等しければ、実用上の設計には役立つものと考えられる。機械工学便覧の教えるところによれば、長さ  $\ell$  なる梁の左端より  $\ell_1$  なる場所に  $W$  なる集中荷重が印加された場合の、 $X = 0$  におけるモーメントは



第 6.3 - 3 図

$$M_{x=0} = \frac{W \ell_1 \ell_2^2}{\ell^2} \dots\dots\dots (6.3-1)$$

もしも  $W$  が梁の中央に印加された場合には

$$M_{x=0} = \frac{W \ell}{8} \quad \text{ただし} \quad \ell_1 = \frac{\ell}{2} \quad \dots\dots\dots (6.3-2)$$

(20/56)

Wなる荷重が梁の $1/4$ ,  $3/4$  のところに2個印加されたときは

$$M_{x=0} = \frac{W \frac{\ell}{4} \cdot (\frac{3}{4} \ell)^2}{\ell^2} + \frac{W \frac{3}{4} \ell \cdot (\frac{\ell}{4})^2}{\ell^2} = \frac{3W\ell}{16} \dots\dots (63-3)$$

多層梁の断面二次モーメントは銅線束の所でも述べたように、絶縁紙の性質によつて左右されきわめて複雑な値をもつが、簡単に考える場合にはつぎのように考えればよいということが結論づけられている。

$$I_{eq} = n \cdot \frac{1}{12} b h^3 \cdot m \quad Z_{eq} = n \cdot \frac{1}{6} b h^2 \cdot m \quad \dots\dots (63-4)$$

但し  $n$  : 層数 (積み高方向)

$b$  : 素線の巾

$h$  : 素線の高さ

$m$  : 並列導体数

したがって中央一点にWなる荷重印加の場合

$$\sigma_{x=0} = \frac{\frac{W\ell}{8}}{n \cdot \frac{1}{6} b h^2 \cdot m} = \frac{3}{4} \frac{W\ell}{n \cdot m \cdot b h^2} \dots\dots (63-5)$$

$1/4$ ,  $3/4$  二点にそれぞれWなる荷重印加の場合

$$\sigma_{x=0} = \frac{\frac{3W\ell}{16}}{n \cdot \frac{1}{6} b h^2 \cdot m} = \frac{9}{8} \frac{W\ell}{n \cdot m \cdot b h^2} \dots\dots (63-6)$$

実際のコイルは、コイル巾は相当に広いものであるから、上述のように両端固定の梁と仮定する場合には、 $\ell$ の大きさとして何を選ぶかによって(63-5,6)式の値は大きな差が生ずる。コイルの心形寸法、コイル外形寸法、コイル平均長に相当する点の長さを使用し固定端について求めた結果と実測値を比較すると次表のようになる。

第63-1表 集中荷重における歪

	L方向 1点 120 kg	L方向 2点 150kg × 2	S方向 1点 100kg	S方向 2点 100kg × 2
内法寸法	300 $\mu$	564 $\mu$	702 $\mu$	1050 $\mu$
平均寸法	464	870	834	1260
外法寸法	627	1180	995	1495
実測値	520	755	183	438

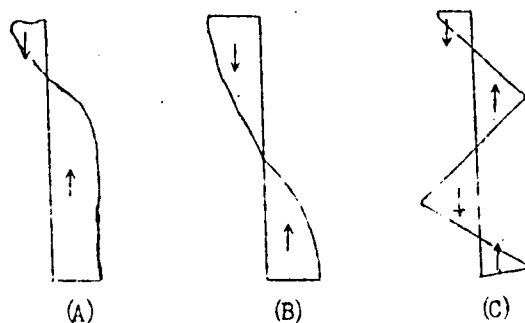
これらの結果を見ると計算値と実測値の間に相当の開きがある。とくに一見不思議に思えるこ

とは、L方向のほうがS方向よりも梁の長さが短い（約 $1/2$ 以下）にもかかわらず、固定端と考えた場合の端部における歪の量が約2倍大きいということである。これは多層梁と考えたコイル素線一本一本に巻いてある絶縁紙の影響であると考えられる。コイル内周に加えられた荷重が、順次、外周に向つて力を伝え、多層が荷重を分担するためには、内側層が撓んで絶縁紙を圧縮し、絶縁紙の撓み-荷重曲線に従つた荷重がつぎの層に伝えられるわけである。ところが、絶縁紙の撓み-荷重特性は非常に大きな非直線性を持ち、とくに荷重の小さい間は撓み量は大きい。そこで梁の長さ $l$ が短いものでは最内周の撓みは小さく、絶縁紙を介してつぎの層に力を伝える量が小さいので、最内周層が大きな荷重を分担することになり、歪が大きくなっているものと考えられる。

以上の結果より矩形コイルの特性を多層直線梁の両端固定と考え集中荷重で検討することは、適当な方法ではないと考えられるので分布荷重で検討することにする。

### 6.3.2 分布荷重に対する性質（直線梁としての考察）

変圧器コイルに発生する電磁力分布は3.6.2で詳論したように、大別して三つの形がある。しかしこれらは結局のところお互いに押し合う分布荷重の相殺しきれなかった残りの力が垂直力として残りコイルを変形させるのである。したがって、コイルの垂直方向電磁力に対する強度検討を行なうためにはこれと似た力の分布の下に行なう必要がある。



第6.3-4図 垂直電磁力の分布形

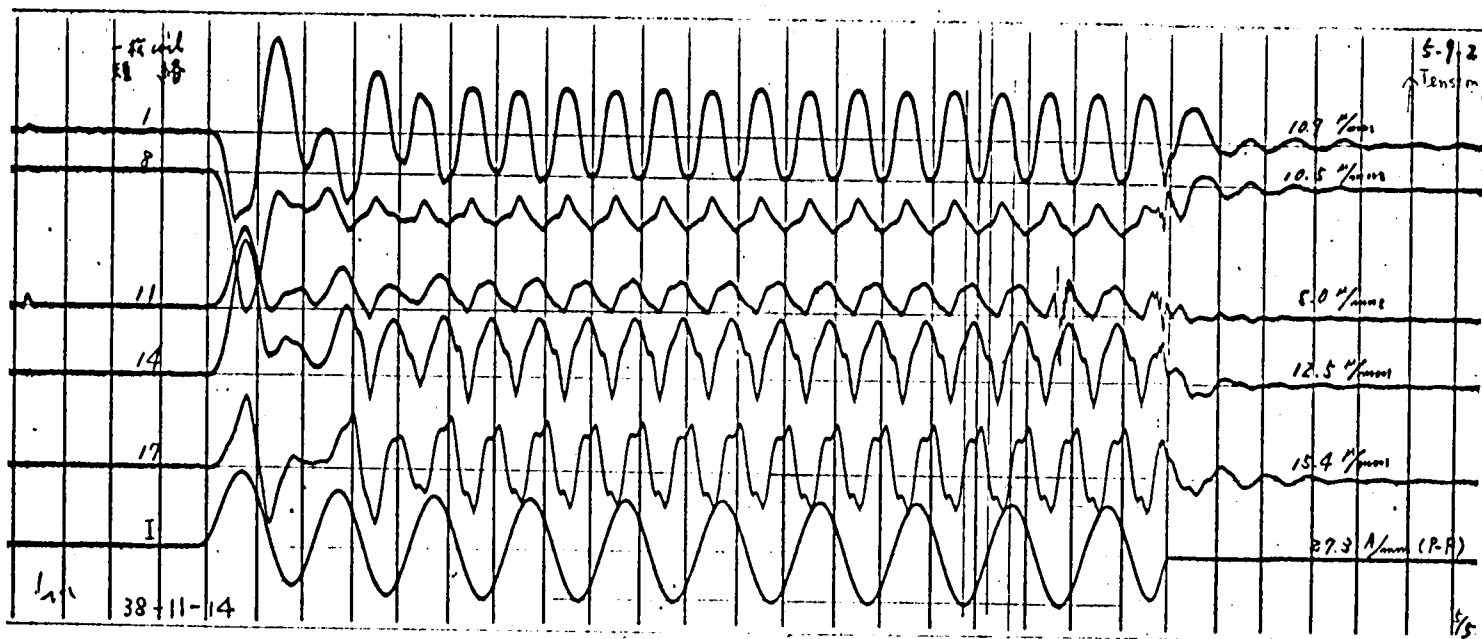
#### 1枚コイルの短絡

分布荷重を与える方法としていろいろの手段が考えられるが、もっとも簡単な方法としてコイル1枚の短絡試験を実施した。使用コイルは集中荷重のときに用いた#3コイルである。試験にさきだち、抵抗紙模倣法により各コイル素線に働く電磁力の推定を行なった結果によれば、巻線電流100Aのとき

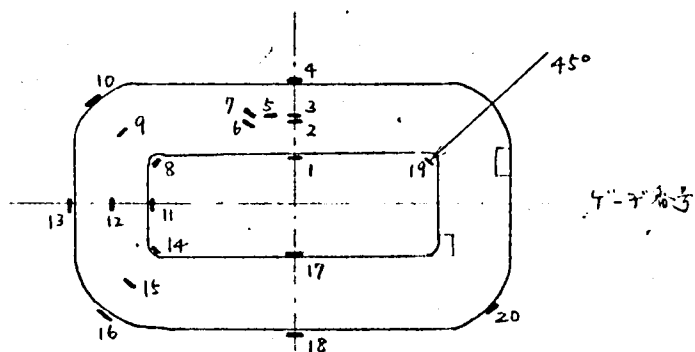
長い梁で〔S方向〕  $1.09 \frac{\text{kg}}{\text{M}}$

短い梁で〔L方向〕  $0.77 \frac{\text{kg}}{\text{M}}$

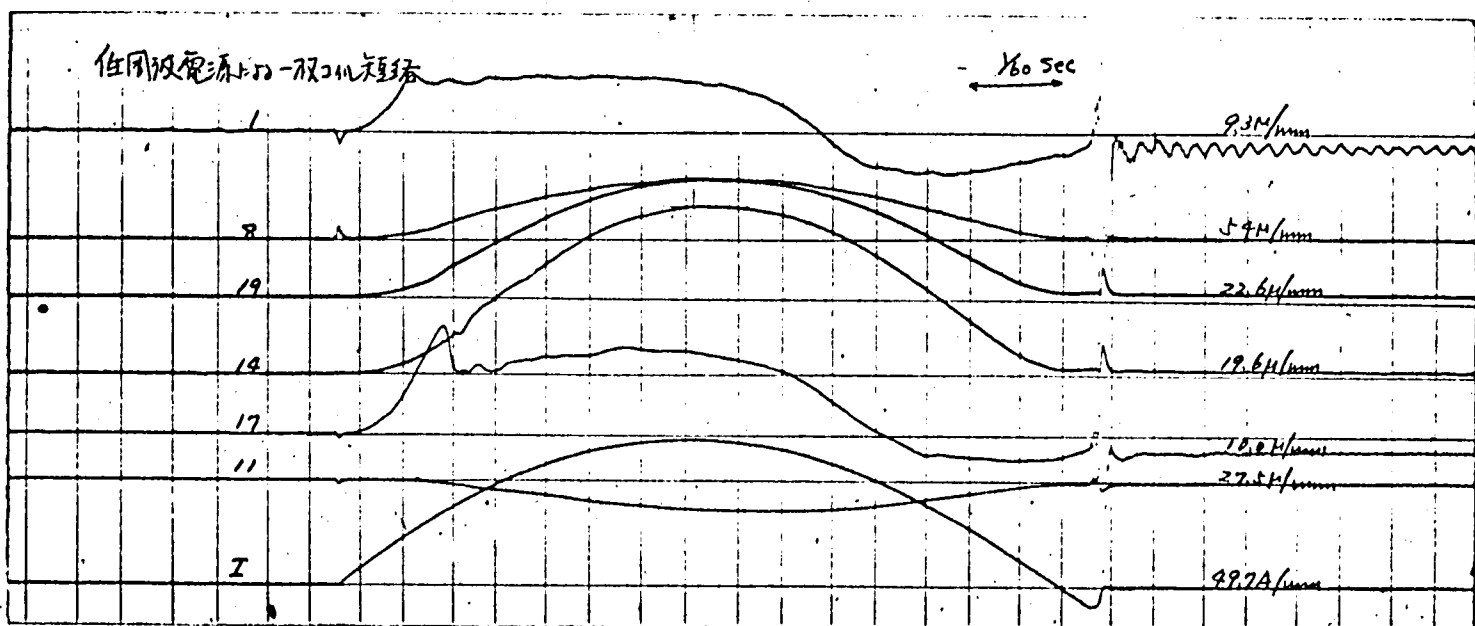
であった。交流200Vを直接印加して通電し、各部に発生した歪のオシロの1例は第6.3-5図に示すとおりである。測定にあたっては、ゲージの耐圧の都合上内周、外周、巾中央に分けて測定した。短絡電流の最高値は1200A (peak-to-peak)程度である。



第6.3-5图 コイル一組の交流短絡



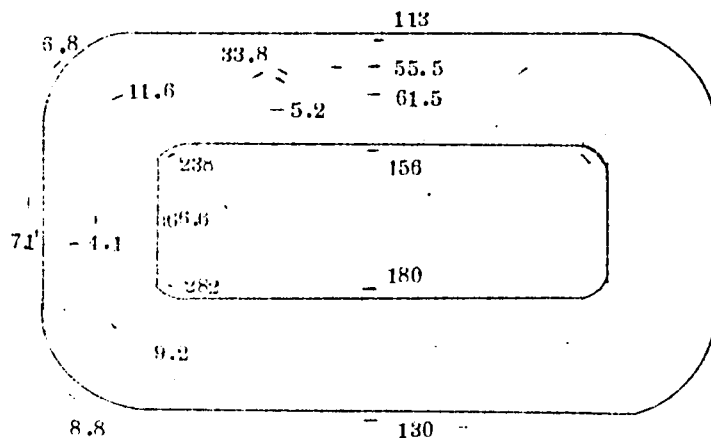
第6.3-8图 コイル一組の低周波短絡



第 6 3 - 6 図

応力分布図 (1000 A)

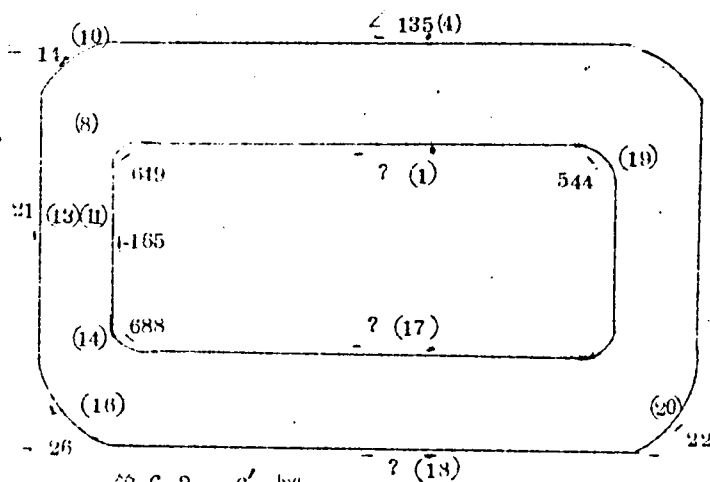
オシロの波形を検討してみるに、  
きわめて不思議な歪のあらわれか  
たをする。とくに梁の中央におけ  
る歪は圧縮、引張りの両極性がみ  
られる。電磁力は交流電流の 2



乗に比例するから、つねに一方向にのみ変化する (120 $\sim$ ) にもかゝらず、歪が正負に振れるのは、コイルを機械系として考えた場合、機械的振動の固有周波数が励振する電磁力にきわめて近いことと、多層によるためと考えられる。たとえば測定点 1 (長い梁の中央点) についてみると、電流遮断後の振動は、コイルの固有振動数によるものであるが、ほぼ 120 $\sim$  に等しい。他のエレメントのデータによっても、長い梁の共振周波数は 120 $\sim$ 135 $\sim$  近辺にあるらしい。短い梁のほうははるかに高く 500 $\sim$  程度である。変圧器コイルは、製作時にコイル巻き機によって相当の張力をかけたまゝ成形されていくのであるが、できあがり状態で直線部には、コイル巾方向になんらの力も残っていない (R 部においてはよく縮んでいる)。そこで、短絡電流が流れて電磁力が働くと、力図第 6 3 - 4 (B) 図のように、コイル巾中央に各素線を集める方向に働き、お互に打消し合った残りがコイルを拡げようとする。高速度カメラで観測すると第 6 3 - 7 図のようになり、

り、外周点は一度コイルが縮まる  
方向に動いていることがよくわか  
る。またコイル内周点においても  
電磁力が 0 になるときに内側にオ  
バーランしている場合のあるこ  
とも認められる。

今回試験したコイルの固有周波数  
がたまたま 120 $\sim$ にきわめて近く  
現象の把握が困難であり、また大  
形変圧器ではコイル寸法が大きい



第 6 3 - 6' 図

低周波による短絡 応力分布図

(1466 A) ( ) 内はケーデ番号

ために固有周波数は 120 $\sim$  よりもはるかに低くなり共振現象は生じないであろう。この状態  
のコイルの性質も調べるために、交流発電機の回転数をぐっと低くし、ほとんど直流と考えら

れるような低周波で実験した。オン  
ロを第63-8図に示す。

分布荷重の場合も集中荷重で検討し  
たときと同じようにコイル4本の両  
端固定の梁からなると考えて検討す  
る。

機械工学便覧によれば、両端固定梁  
( $\ell$ ) に分布荷重  $w$  ( $\text{Kg/cm}$ ) がかゝ  
つたとき固定端に発生する曲げモー  
メントは

$$M_{\max} = M_{x=0} = \frac{w\ell^2}{12} \quad \dots (63-7)$$

ゆえに最大応力は等価断面係数  $Z_{eq}$

を考えると

$$\sigma = \frac{M_{x=0}}{Z_{eq}} = \frac{\frac{w\ell^2}{12}}{n \cdot \frac{1}{6} b h^2 \cdot m} \quad \dots (63-8)$$

短絡電流 1000 A の場合に実験結果

を換算し、理論式と比較すると長い梁に対し

$$w = 109 \text{ kg} / 100 \text{ cm}$$

$$Z_{eq} = 1.18 \text{ cm}^3$$

$$\ell_{\max} = 117.6 \text{ cm}$$

$$\ell_{\text{med}} = 99 \text{ cm}$$

$$\ell_{\min} = 83 \text{ cm}$$

$$\therefore \sigma_{\max} = 1060 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{\text{med}} = 713 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{\min} = 530 \text{ kg/cm}^2$$

コイル外周 相当

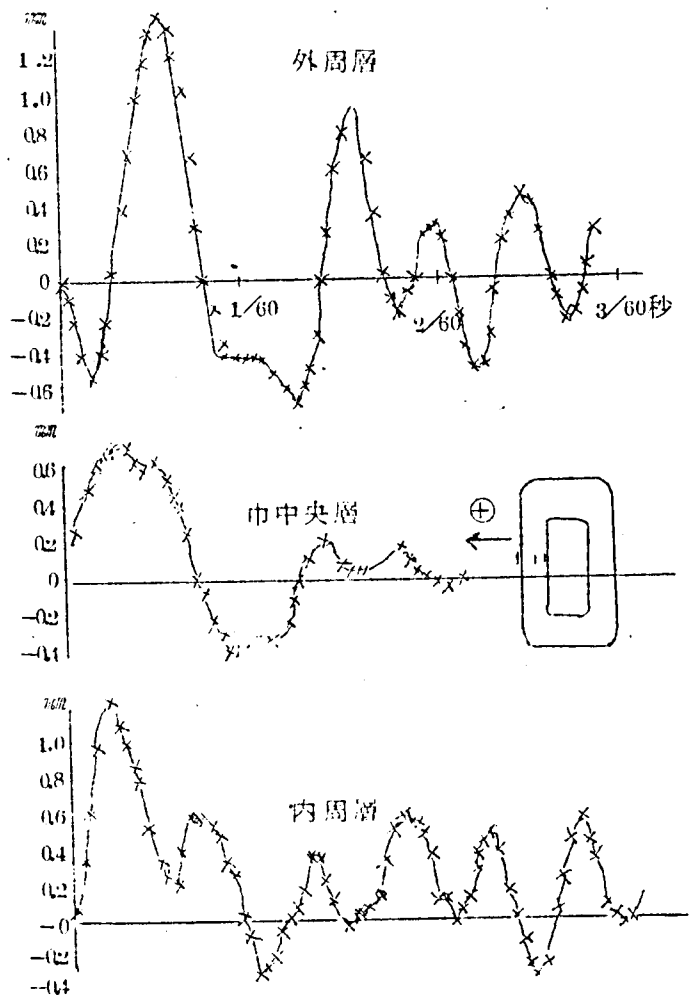
コイル平均長 相当

コイル内周 相当

$$\epsilon_{\max} = 1850 \mu$$

$$\epsilon_{\text{med}} = 602 \mu$$

$$\epsilon_{\min} = 425 \mu$$



第63-7図 コイル素線の動き

実験結果は1000 Aに換算して下記の値である。

60% の場合      平均   237  $\mu$    (218, 256)

4 $\infty$  の場合 平均  $311\mu$  ( $302, 320$ ) .

抵抗紙模擬、漏洩磁束実験より電磁力を推定する場合、コイルの運動を考えていないから4000Gの時のデータを使用すべきである。そうすると計算値と実験値は大略一致し計算値のほうが35%ほど大きい。

この誤差の原因として考えられるのは、

1. 矩形コイルであるので曲り梁として取扱うべきであるものを両端固定の直線梁と考えたこと
2. 多層梁を考えると、一層の断面係数の層数倍の等価断面係数を持つ一層の梁と考えたが、層数が非常に大きくなると誤差が大きくなるのかもしれない。
3. 多層梁の等価断面係数という考えかたは絶縁紙の非直線のために層間の圧縮荷重がある範囲しか利用できない。

という3つの疑問点である。

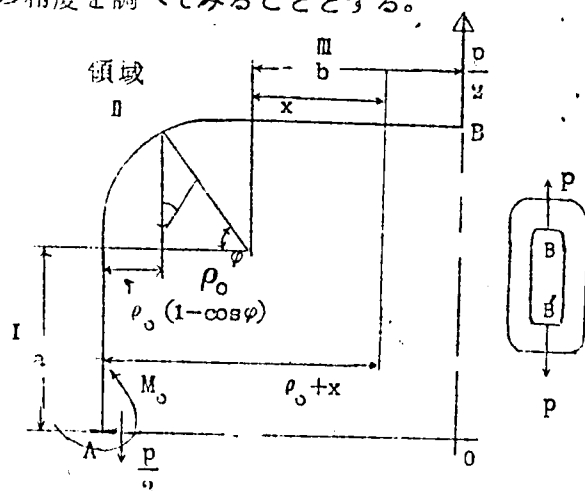
### 6.3.3 曲り梁の理論 (集中荷重)

矩形コイルを両端固定の梁4本よりなると考えることは、材料力学的に考えて大部むりがあるので、曲り梁としての考察を行なうこととする。コイルは直線梁と考えた場合にも問題としたように多層からなっているために、曲り梁としてあつかうときにもこの影響が大きく入ってくるものと予想されるが、多層の問題はのちほど検討するとして、まづ一層の曲り梁の理論を展開し、光弾性実験の結果と比較して、理論値の精度を調べてみることにする。

右図はコイルの  $1/4$  を画いたものである。

コイルは上下、左右に対して対称であり、図のように上下垂直方向に引張り荷重をかける場合にはこの対称性は壊れないので、 $1/4$ だけを考えればよい。

一般に梁の中心線から  $y$  だけ離れた点における応力  $\sigma$  は、曲げモーメント  $M$ 、及び軸力  $N$  が作用する場合にはつぎの式で与えられる。

第 63-9 図  $\alpha \approx 1/4$  図

(25/56)

$$\text{直線部} \quad \sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_0 e}{I} \quad \dots\dots\dots (63-12)$$

$$\text{曲り部} \quad \sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{A \rho_0} \left(1 + \frac{1}{k} \times \frac{e}{\rho_0 + e}\right) \quad \dots\dots\dots (63-13)$$

ただし

A : 断面積

$\rho_0$  : 中心線の曲率半径

k : 梁の断面の形と寸法，ならびに中心線の変形前の曲率半径が定まると求まる。矩形断面 ( $b' \times h$ ) に対しては

$$k = \frac{\rho_0}{h} \log \frac{\rho_0 + \frac{1}{2}h}{\rho_0 - \frac{1}{2}h} - 1 \quad \dots\dots\dots (63-14)$$

e : 曲り梁中心線からの距離  
曲率中心から離れる方向を正とする

ゆえに任意の点の曲げモーメント  $M$  と軸力  $N$  が求まれば，その点の応力  $\sigma$  が求まるのであるが，第 63-9 図において，O A 断面では剪断力は働いておらず，鉛直引張荷重  $P/2$  と，曲げモーメントが作用している。この曲げモーメントを  $M_0$  と置くと，3 つの領域における曲げモーメントと軸力はつぎのようになる。

領域 I

$$\text{軸力} \quad N_I = P/2 \quad \dots\dots\dots (63-15)$$

$$\text{曲げモーメント} \quad M_I = M_0 \quad \dots\dots\dots (63-16)$$

領域 II

$$\text{軸力} \quad N_{II} = \frac{P}{2} \cos \varphi \quad \dots\dots\dots (63-17)$$

$$\text{曲げモーメント} \quad M_{II} = M_0 + \frac{P}{2} \rho_0 (1 - \cos \varphi) \quad \dots\dots\dots (63-18)$$

領域 III

$$\text{軸力} \quad N_{III} = 0 \quad \dots\dots\dots (63-19)$$

$$\text{曲げモーメント} \quad M_{III} = M_0 + \frac{P}{2} (\rho_0 + x) \quad \dots\dots\dots (63-20)$$

ここで未知の曲げモーメントは，対称を考えると水平断面と鉛直断面とは変形後も直角であって，傾き角が変化しないという条件から求まる。傾き角は一般につぎの式で与えられる。

$$\text{直線部} \quad i = \int_{x_1}^{x_2} \frac{M}{EI} dx \quad \dots\dots\dots (63-21)$$

$$\text{曲り梁} \quad i = \frac{1}{EA} \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} \left( N + \frac{M}{\rho_0} + \frac{M}{k\rho_0} \right) d\varphi \quad \dots\dots\dots (63-22)$$



ゆえにこの場合には

$$\begin{aligned}
 i &= \int_0^a \frac{M_I}{EI} dy + \frac{1}{EA} \int_0^{\frac{\pi}{2}} N_{II} + \frac{M}{\rho_0} \left( 1 + \frac{1}{k} \right) d\varphi + \int_0^b \frac{M_{III}}{EI} dx \\
 &= \int_0^a \frac{M_0}{EI} dy + \frac{1}{EA} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left( \frac{P}{2} \cos\varphi + \frac{(1+k)}{\rho_0 k} \left( M_0 + \frac{P}{2} \rho_0 (1 - \cos\varphi) \right) \right) d\varphi \\
 &\quad + \int_0^b \frac{1}{EI} \left( M_0 + \frac{P}{2} (\rho_0 + x) \right) dx \\
 &= \frac{M_0}{EI} a + \frac{1}{EA} \cdot \frac{\pi(1+k)}{2k\rho_0} M_0 + \frac{1}{EA} \cdot \frac{P}{2k} \left\{ \frac{\pi}{2} (1+k) - 1 \right\} \\
 &\quad + \frac{M_0}{EI} b + \frac{1}{EI} \left[ \frac{P}{2} \rho_0 b + \frac{P}{4} b^2 \right] = 0 \\
 \therefore M_0 &= - \frac{\frac{P}{2Ak} \left\{ \frac{\pi}{2} (1+k) - 1 \right\} + \frac{Pb}{2I} \left( \rho_0 + \frac{b}{2} \right)}{\frac{a+b}{I} + \frac{1}{A} \frac{\pi(1+k)}{2k\rho_0}} \dots\dots\dots (63-23)
 \end{aligned}$$

(63-23) と (63-15) ~ (63-20) の式を組合せ、各部における曲げモーメントおよび軸力を求め、(63-12)、(63-13) 式に代入すれば、直線部、曲り梁における応力が求まることになる。(63-12)、(63-13) 式においては、y の方向は曲率中心から離れる方向を+にしている。#3 コイルの寸法を用いて各部の応力分布を計算してみる。

1) 長軸に荷重した場合 (S 方向)

$$e = -78 \text{ mm} \quad (\text{内周}) \quad e = 78 \text{ mm} \quad (\text{外周})$$

$$h = 156 \text{ mm}$$

$$b' = 105 \text{ mm}$$

$$P = 100 \text{ kg}$$

$$A = 105 \times 156 = 1640 \text{ mm}^2$$

$$a = (310 - 40 \times 2) / 2 = 115 \text{ mm}$$

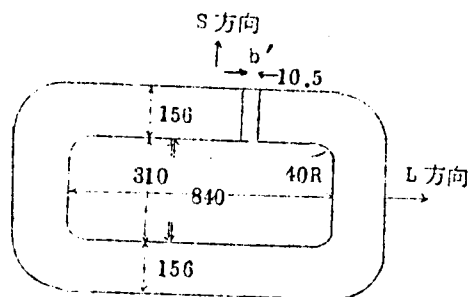
$$b = (840 - 40 \times 2) / 2 = 380 \text{ mm}$$

$$\rho_0 = 156 / 2 + 40 = 118 \text{ mm}$$

$$k = \frac{118}{156} \log \frac{118+78}{118-78} - 1 = 0.2$$

$$I = \frac{1}{12} \cdot 105 \times 156^3 = 3.37 \times 10^6$$

$$\therefore M_0 = -9800 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$



第 63-10 図 #3 コイル寸法

これらの値を代入して計算すると応力分布は次式で求まる。

	内 周	外 周
領域 I	$\sigma = 0.257$	$-0.1955$
領域 II	$\sigma = 0.295 \cos \varphi - 0.1354$	$-(0.06 \cos \varphi + 0.0568)$
領域 III	$\sigma = 0.0869 - 0.001173x$	$0.001173x - 0.0869$

## II) 短軸に荷重した場合 (L 方向)

S 方向と同様に計算する

$$P = 120 \text{ kg}$$

$$a = 380$$

$$b = 115$$

応力分布は次式であたえられる。

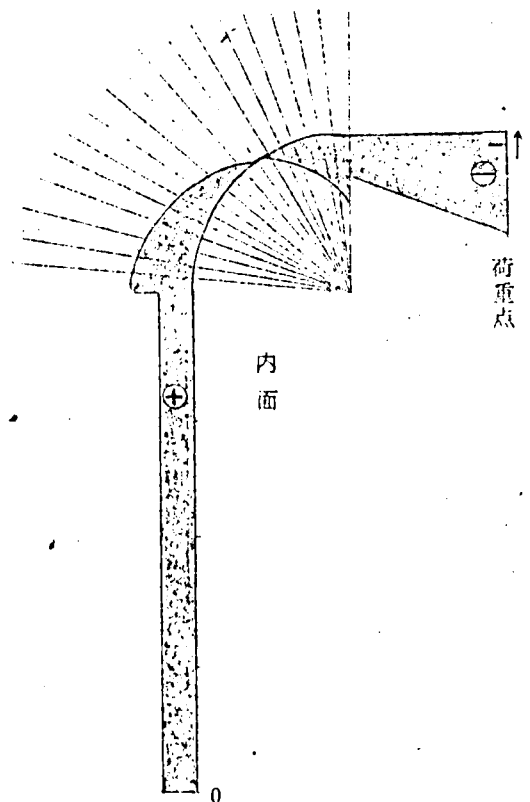
	内 周	外 周
領域 I	$\sigma = 0.0991$	$-0.0259$
領域 II	$\sigma = 0.853 \cos \varphi - 0.197$	$-0.0717 \cos \varphi + 0.0676$
領域 III	$\sigma = -(0.103 + 0.00141x)$	$0.1036 + 0.00141x$

軸中央に荷重した場合の応力分布図を第 6-3-11

図に示す。この理論式の正当性を調べるために、

光弾性実験法を用い実験的に検討を行なった。

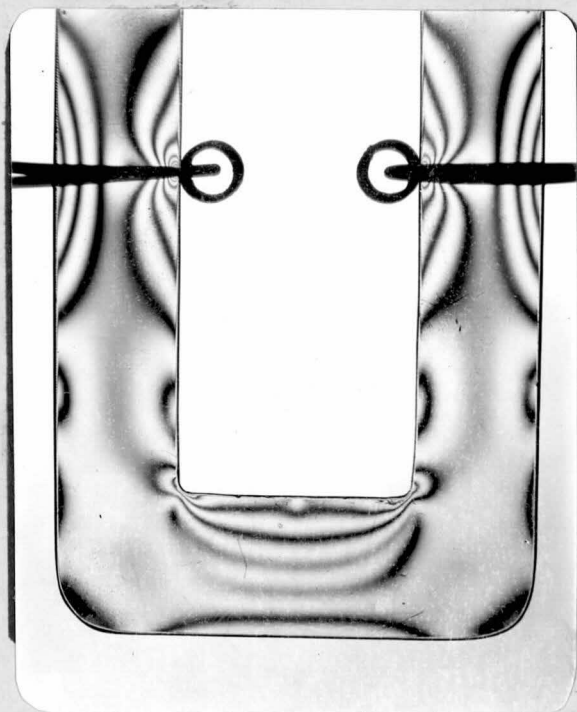
光弾性実験法の原理は、透明な等方体に応力を加えると、その等方体は一時的に結晶体の性質を有するようになり、複屈折性を帯びる。したがってこれに入射された光は速度の異なる 2 つの偏光に分解されるが、これら両偏光の間に生ずる光路差は主応力差に比例するので、このことを利用して応力測定を行なうものである。光弾性実験を行なうには、普通エポキシ樹脂のような光弾性的性質をもつ透明材料の、厚さ 6 mm 程度の板を用い、それから研究しようとする構造物の原形と相似形の小模型を作る。これに原形と相似の荷重を加え、それに白色または単色の偏光を透して、あらわれる



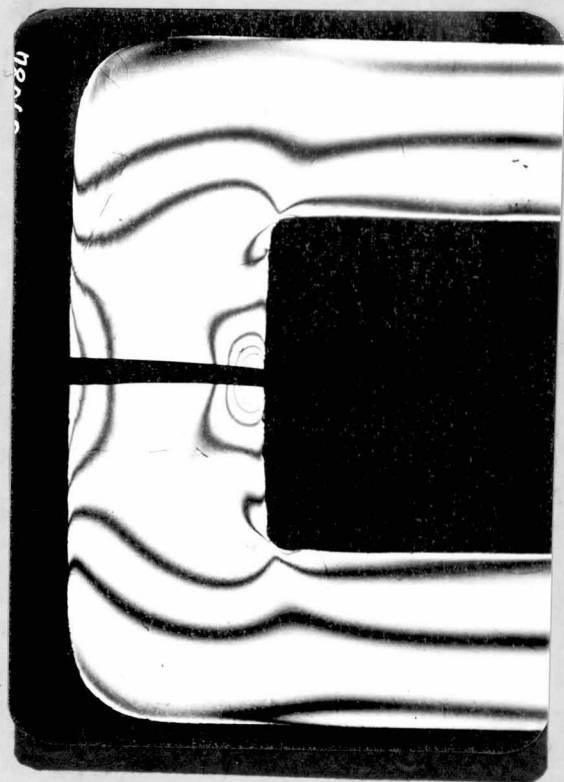
第 6-3-11 図 短軸集中荷重した時の  
応力分布図

干渉縞模様を写真に撮影して調べる。この模様から容易かつ精密に所要の応力分布、とくに

応力集中の生ずる場所とその値がわかるというのがこの実験法の特徴である。#3 コイルについて縮尺モデルを作り実験した結果の写真が下図であって、この写真よりコイル内周、外周における応力分布を求め、さきに理論計算によって求めた値と比較したところ計算値の低りが幾分高目であつた。また理論計算においては円弧と直線との接合部の応力は不連続になっているが、光弾性実験結果では連続になり、その値は計算結果の不連続値の平均に近い値であつた。



写真



#### 6.3.4 曲り梁理論（分布荷重）

光弾性実験の結果と曲り梁による理論計算の結果比較により、矩形コイルが一層物であるときには理論式の推定精度もよいことがわかったが、この理論を多層の矩形コイルに用いるときには相当問題がある。（6.3-2.3）,（6.3-1.3）式の示すように  $M_0, \sigma$  は曲率半径  $\rho_0$  の非直線的函数であるために、直線梁のときに導入したような等価断面二次モーメント、及び等価曲率半径を求めることには多少の無理があるように感ぜられる。そこで等価断面二次モーメントの基本的概念に立ち帰り、曲り梁全体にかゝる荷重の  $1/n$  ( $n$ : ターン数) が各層にかゝつたとして応力計算を行なってみることとする。計算労力は相当大きくなるので計算機を使用するとして、まづ一般的な理論式を立てることとする。第6.3-13図はモーメント図であるが、分布荷重は長短二つの直線部、R部それぞれ異なる大きさのものが作用するとした。図より軸力、曲げモーメントを計算するとつぎのようになる。

領域 I

$$\text{軸力} \quad N_I = bq_3 + \int_0^{\frac{\pi}{2}} q_2 \sin \varphi \cdot \rho_0 d\varphi = bq_3 + q_2 \rho_0 \quad \dots\dots (6.3-24)$$

領域Ⅱ 分布荷重  $q_2$

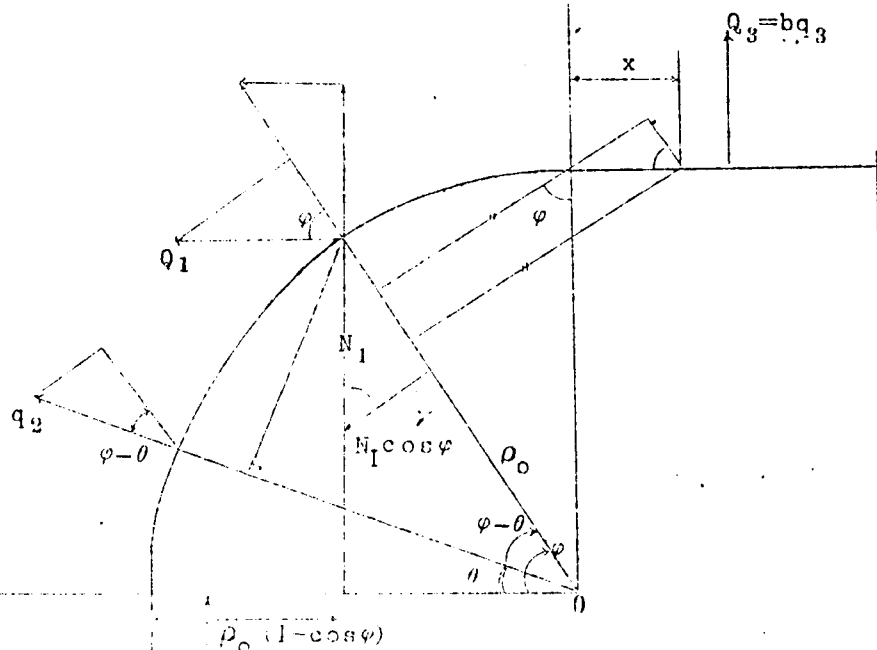
領域Ⅲ 分布荷重  $q_3$

$$N_{II} = N_I \cos \varphi + Q_I \sin \varphi + \int_0^\varphi q_2 \sin(\varphi - \theta) \rho_0 d\theta$$

$$M_{II} = M_0 + N_I \rho_0 (1 - \cos \varphi)$$

$$- Q_I \left( \frac{a}{2} + \rho_0 \sin \varphi \right)$$

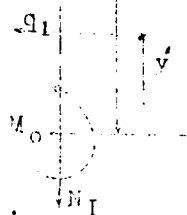
$$- \int_0^\varphi q_2 \rho_0 d\theta \cdot \rho_0 \sin(\varphi - \theta)$$



領域Ⅰ 分布荷重  $q_1$

$$N_I = Q_3 - \int_0^{\frac{\pi}{2}} q_2 \sin \varphi \rho_0 d\varphi$$

$$M_I = M_0 - \int_0^a q_1 y dy$$



$$N_{III} = [N_{II}]_{\varphi = \frac{\pi}{2}}$$

$$= Q_1 + \int_0^{\frac{\pi}{2}} q_2 \cos \varphi \cdot \rho_0 d\varphi$$

$$M_{III} = M_0 + N_I (\rho_0 + x) - Q_1 \left( \rho_0 + \frac{a}{2} \right)$$

$$- \int_0^{\frac{\pi}{2}} q_2 \rho_0 d\varphi \cdot (\rho_0 \cos \varphi + x \sin \varphi)$$

$$- \int_0^x q_3 x dx$$

第 6.3 - 13 図 軸力・モーメント解析図

$$\text{曲げモーメント } M_I = M_0 + \int_0^y q_1 y dy = M_0 - \frac{1}{2} q_1 y^2 \quad \dots\dots\dots (63-25)$$

領域II

$$\begin{aligned} \text{軸力 } N_{II} &= N_I \cos \varphi + \int_0^{\varphi} q_2 \sin(\varphi - \theta) \rho_0 d\theta + q_1 a \sin \varphi \\ &= (bq_3 + \rho_0 q_2) \cos \varphi + \rho_0 q_2 (1 - \cos \varphi) + q_1 a \sin \varphi \\ &= bq_3 \cos \varphi + \rho_0 q_2 + a q_1 \sin \varphi \quad \dots\dots\dots (63-26) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{曲げモーメント } M_{II} &= M_0 + (bq_3 + q_2 \rho_0) \rho_0 (1 - \cos \varphi) - a q_1 \left( \frac{a}{2} + \rho_0 \sin \varphi \right) \\ &\quad - \int_0^{\varphi} q_2 \rho_0 \cdot \rho_0 \sin(\varphi - \theta) d\theta \\ &= M_0 + (bq_3 + q_2 \rho_0) \rho_0 (1 - \cos \varphi) - a q_1 \left( \frac{a}{2} + \rho_0 \sin \varphi \right) \\ &\quad - q_2 \rho_0^2 (1 - \cos \varphi) \\ &= M_0 + bq_3 \rho_0 (1 - \cos \varphi) - a q_1 \left( \frac{a}{2} + \rho_0 \sin \varphi \right) \dots\dots\dots (63-27) \end{aligned}$$

領域III

$$\text{軸力 } N_{III} = (N_{II})_{\varphi=\frac{\pi}{2}} = \rho_2 q_2 + a q_1 \quad \dots\dots\dots (63-28)$$

$$\begin{aligned} \text{曲げモーメント } M_{III} &= M_0 + N_I (\rho_0 + x) - a q_1 \left( \rho_0 + \frac{a}{2} \right) \\ &\quad - \left( \int_0^{\frac{\pi}{2}} q_2 \rho_0 d\varphi \cdot (\rho_0 \cos \varphi + x \sin \varphi) - \int_0^x q_3 x dx \right) \\ &= M_0 + (bq_3 + q_2 \rho_0) (\rho_0 + x) - a q_1 \left( \rho_0 + \frac{a}{2} \right) \\ &\quad - q_2 \rho_0 (\rho_0 + x) - \frac{1}{2} q_3 x^2 \\ &= M_0 + bq_3 (\rho_0 + x) - a q_1 \left( \rho_0 + \frac{a}{2} \right) - \frac{1}{2} q_3 x^2 \dots\dots\dots (63-29) \end{aligned}$$

$$i = \int_0^a \frac{M_I}{EI} dy + \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{EA} (N_{II} + \frac{M_{II}}{\rho_0} (1 + \frac{1}{k})) d\varphi + \int_0^b \frac{M_{III}}{EI} dx = 0 \text{ に代入して}$$

$$\begin{aligned} \therefore i &= \int_0^a \frac{M_0}{EI} dy - \int_0^a \frac{1}{EI} \cdot \frac{1}{2} q_1 y^2 dy + \frac{1}{EA} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (a q_1 \sin \varphi + \rho_0 q_2 + bq_3 \cos \varphi) d\varphi \\ &\quad + \frac{(1 + \frac{1}{k})}{EA \rho_0} \int_0^{\frac{\pi}{2}} M_0 d\varphi + \frac{(1 + \frac{1}{k})}{EA \rho_0} \int_0^{\frac{\pi}{2}} [ + bq_3 \rho_0 (1 - \cos \varphi) - a q_1 \left( \frac{a}{2} + \rho_0 \sin \varphi \right) ] d\varphi \\ &\quad + \frac{1}{EI} \int_0^b M_0 dx + \frac{1}{EI} \int_0^b [ + bq_3 (\rho_0 + x) - a q_1 \left( \rho_0 + \frac{a}{2} \right) - \frac{1}{2} q_3 x^2 ] dx \quad \dots\dots\dots (63-30) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -M_o \left( \frac{a}{I} + \frac{\pi (1 + \frac{1}{K})}{2A\rho_o} + \frac{b}{I} \right) \\
 & = \frac{-q_1 a^3}{6I} + \frac{1}{A} (aq_1 + \frac{\pi}{2} \rho_o q_2 + bq_3) + \frac{(1 + \frac{1}{K})}{A\rho_o} [ +bq_3 \rho_o (\frac{\pi}{2} - 1) \\
 & \quad -aq_1 (\frac{\pi a}{4} + \rho_o) ] + \frac{1}{I} [ +bq_3 (\rho_o b + \frac{b^2}{2}) - abq_1 (\rho_o + \frac{a}{2}) - \frac{1}{6} b^3 q_3 ] \\
 \therefore -M_o & = \left[ -\frac{q_1 a^3}{6I} + \frac{\pi \rho_o q_2}{2A} + \frac{bq_3}{AK} \left[ \frac{\pi}{2} (K+1) - 1 \right] - \frac{\pi (K+1)}{4A\rho_o K} a^2 q_1 - \frac{aq_1}{AK} \right. \\
 & \quad \left. + \frac{1}{I} b^2 q_3 \left( \frac{b}{3} + \rho_o \right) - \frac{abq_1}{I} \left( \rho_o + \frac{a}{2} \right) \right] / \left[ \frac{a}{I} + \frac{\pi (1 + \frac{1}{K})}{2A\rho_o} + \frac{b}{I} \right] \\
 & \quad \dots\dots\dots (6.3-30)
 \end{aligned}$$

ゆゑに曲り梁各部の応力は (6.3-12) , (6.3-13) 式を用いてつぎのように計算される。

たゞし  $e = -\frac{h}{2}$  の時 内周

$e = \frac{h}{2}$  の時 外周 の応力となる

領域 I

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_i &= \frac{N_I}{A} + \frac{M_I}{I} \left( -\frac{h}{2} \right) \\
 \sigma_o &= \frac{N_I}{A} + \frac{M_I}{I} \left( \frac{h}{2} \right)
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.3-31)$$

領域 II

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_i &= \frac{N_{II}}{A} + \frac{M_{II}}{A\rho_o} \left( 1 + \frac{1}{K} \frac{(-\frac{h}{2})}{\rho_o + (-\frac{h}{2})} \right) \\
 \sigma_o &= \frac{N_{II}}{A} + \frac{M_{II}}{A\rho_o} \left( 1 + \frac{1}{K} \frac{\frac{h}{2}}{\rho_o + \frac{h}{2}} \right)
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.3-32)$$

領域 III

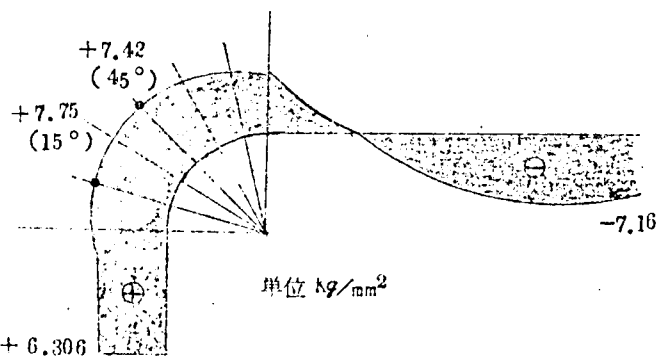
$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_i &= \frac{N_{III}}{A} + \frac{M_{III}}{I} \left( -\frac{h}{2} \right) \\
 \sigma_o &= \frac{N_{III}}{A} + \frac{M_{III}}{I} \left( \frac{h}{2} \right)
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.3-33)$$

電子計算機を用いて最内層，最外層および中央層の 1 ターンが独立に存在するとし，分布荷重が次の条件の場合について計算した。

$$\text{短い辺: } -\frac{150}{27} \text{ Kg/M}, \quad \text{円弧: } \frac{175}{27} \text{ Kg/M}, \quad \text{長い辺: } -\frac{200}{27} \text{ Kg/M},$$

これは一枚のコイルの短絡試験を低周波で行なった場合（短絡電流 1466 A）の電磁力にほぼ等しい。多層梁の実験結果からわかったように、等価断面の概念を用いて計算した結果が実験の結果と一致するのは荷重印加側で、その反対側は計算値よりも実験値は小さい。実用上問題となるのは応力の大きい方であるから、この場合も最内層について計算結果を検討してみると（第63-14図）、内周ではR部15°の所に最大値がある。一枚コイルの低周波短絡試験の時に測定したR部45°の場所は7418Kg/mm<sup>2</sup>で、実験値3点の平均780Kg/mm<sup>2</sup>にきわめて近い。また分布の形を検討してみるに、

両端固定梁として考えるのは大部無理な分布であり、矩形コイルは曲り梁として取り扱ったほうがよいことが言える。R部以外のところでは実験と計算とはかならずしも一致していない。理由としては、



測定した最内層は渦巻きになつていて逃げうる構造になつていていることを閑却してある点にあるとも考えられるが、これらの検討はこんどの問題である。

第63-14図 応力分布図

### 6.3.5 曲り梁理論（R部に正弦波分布）

実際の変圧器で、垂直方向電磁力の働くのはいろいろの原因によるが、そのなかでもつとも大きく影響をあたえているのはつぎの事項である。

1. 設計上垂直方向の磁気中心がずれている。
2. タップ抜けの為に磁気中心がずれる。
3. 工作精度上磁気中心がずれる。

普通の設計では、またとくに短絡強度を要求されるような変圧器では、鉄心内の磁気中心をずらせて設計することは考えられないので、鉄心内では磁気中心のズレは小さく、さらにまた鉄心内は四周を鉄心に囲れているために一般に垂直力は小さい。短絡強度を要求されるような変圧器では、普通高圧、低圧群間に面するコイルは、コイル巾を合せて設計するので垂直電磁力は工作精度によるズレだけで生ずる。いまこのズレが上下方向に発生した場合について考えると垂直方向電磁力は磁気中心のズレに比例するので次の図に示すように半径に比してズレが小

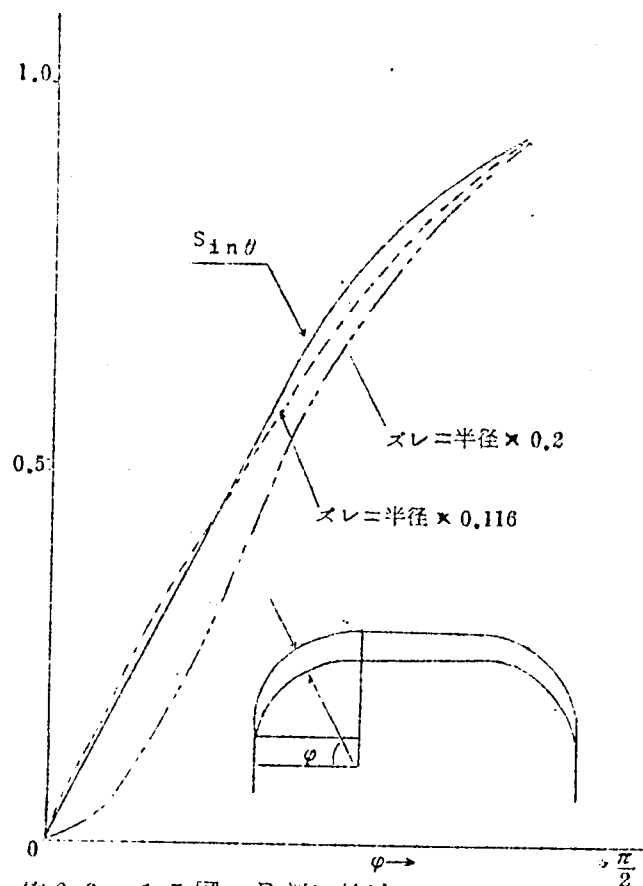
さいときには，R部における垂直電磁力は  $\sin\varphi$  に比例することが裏図による検討の結果判つた。

そこで上記のような条件の場合にコイルの応力分布はどうなるか計算してみることとする。

第63-16図は応力，モーメント説明図であるがこの図において，

$$q_2 = q_3 \sin \varphi$$

でR部における分布荷重があたえられるものとする。さきに行なつたと同様撓み角の変化はないという条件より不確定モーメント  $M_0$  を求めると



第63-15図 R部に於ける垂直電磁力

領域Ⅰ

$$\begin{aligned} N_I &= Q_3 + \int_0^{\frac{\pi}{2}} q_2 \sin \varphi \cdot \rho_0 d\varphi = q_3 b + \int_0^{\frac{\pi}{2}} q_3 \rho_0 \sin^2 \varphi d\varphi \\ &= q_3 b + q_3 \rho_0 \left[ \frac{\varphi}{2} - \frac{1}{4} \sin 2\varphi \right]_0^{\frac{\pi}{2}} = q_3 b + q_3 \rho_0 \cdot \frac{\pi}{4} \quad \dots\dots (63-34) \end{aligned}$$

領域Ⅱ

$$\begin{aligned} N_{II} &= N_I \cos \varphi + \int_0^{\varphi} q_2 \sin (\varphi - \theta) \rho_0 d\theta \\ &= (q_3 b + \frac{\pi}{4} q_3 \rho_0) \cos \varphi + \int_0^{\varphi} q_3 \sin \theta \cdot \sin (\varphi - \theta) \rho_0 d\theta \\ &= (q_3 b + \frac{\pi}{4} q_3 \rho_0) \cos \varphi + q_3 \rho_0 \left[ \sin \varphi \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \cos 2\varphi \right) - \cos \varphi \left( \frac{\varphi}{2} - \frac{1}{4} \sin 2\varphi \right) \right] \quad \dots\dots (63-35) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{II} &= M_0 + N_I \rho_0 (1 - \cos \varphi) - \int_0^{\varphi} q_2 \rho_0 d\theta \sin (\varphi - \theta) \\ &= M_0 + \rho_0 (q_3 b + \frac{\pi}{4} q_3 \rho_0) (1 - \cos \varphi) - \int_0^{\varphi} q_3 \rho_0^2 \sin \theta \cdot \sin (\varphi - \theta) d\theta \\ &= M_0 + \rho_0 (q_3 b + \frac{\pi}{4} q_3 \rho_0) (1 - \cos \varphi) \\ &\quad - q_3 \rho_0^2 \left[ \sin \varphi \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \cos 2\varphi \right) - \cos \varphi \left( \frac{\varphi}{2} - \frac{1}{4} \sin 2\varphi \right) \right] \quad \dots\dots (63-36) \end{aligned}$$



II 領域

分布荷重  $q_2 = -q_3 \sin \varphi$

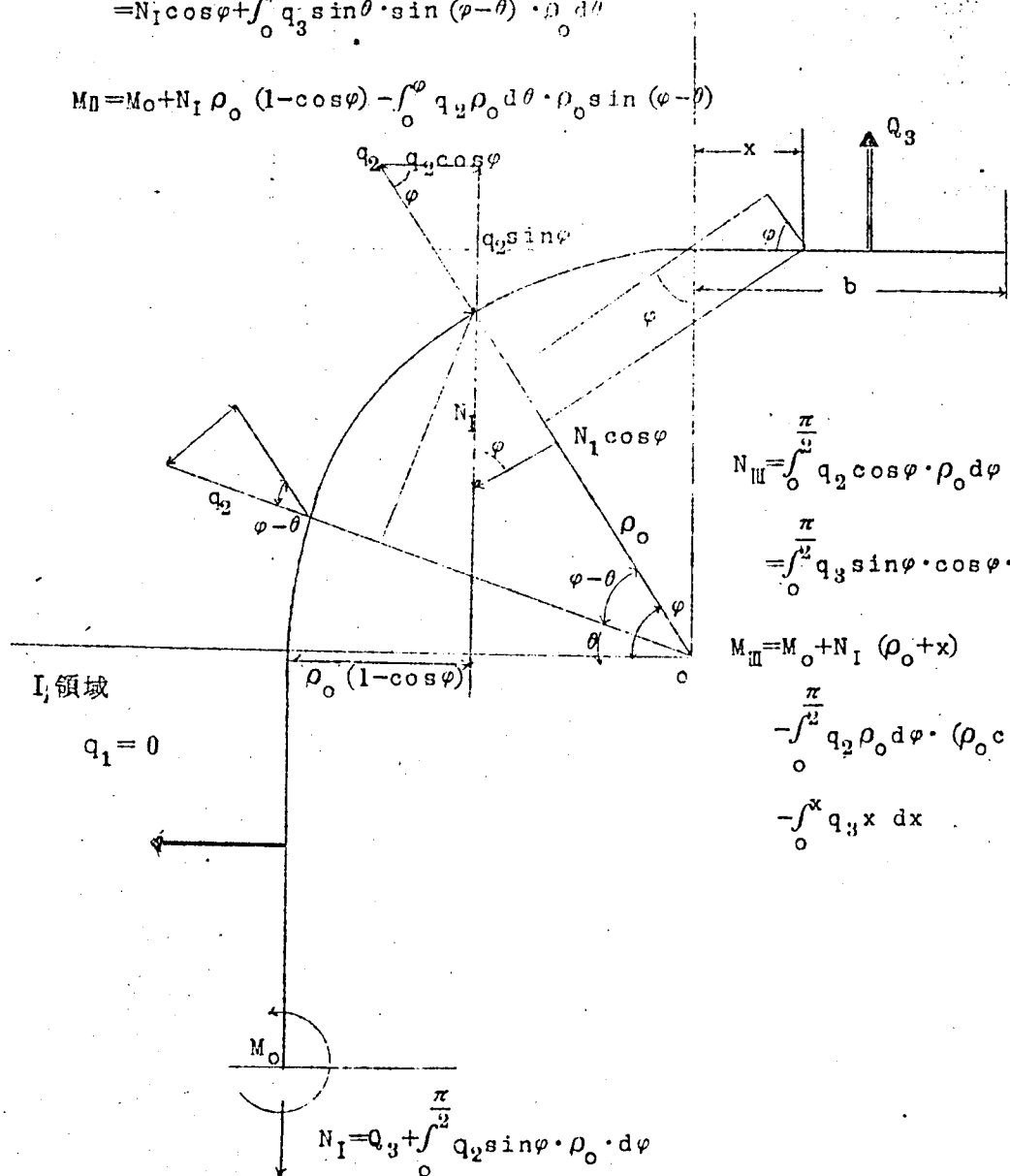
$$N_{II} = N_I \cos \varphi + \int_0^\varphi q_2 \sin (\varphi - \theta) \rho_0 d\theta$$

$$= N_I \cos \varphi + \int_0^\varphi q_3 \sin \theta \cdot \sin (\varphi - \theta) \cdot \rho_0 d\theta$$

$$M_{II} = M_0 + N_I \rho_0 (1 - \cos \varphi) - \int_0^\varphi q_2 \rho_0 d\theta \cdot \rho_0 \sin (\varphi - \theta)$$

III 領域

等分布荷重  $q_3$



$$N_{III} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} q_2 \cos \varphi \cdot \rho_0 d\varphi$$

$$= \int_0^{\frac{\pi}{2}} q_3 \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot \rho_0 d\varphi$$

$$M_{III} = M_0 + N_I (\rho_0 + x)$$

$$- \int_0^{\frac{\pi}{2}} q_2 \rho_0 d\varphi \cdot (\rho_0 \cos \varphi + x \sin \varphi)$$

$$- \int_0^x q_3 x dx$$

$$N_I = q_3 + \int_0^{\frac{\pi}{2}} q_2 \sin \varphi \cdot \rho_0 d\varphi$$

$$= q_3 b + \int_0^{\frac{\pi}{2}} q_3 \rho_0 \sin^2 \varphi d\varphi = q_3 b + q_3 \rho_0 \left[ \frac{x}{2} - \frac{1}{4} \sin 2x \right]_0^{\frac{\pi}{2}}$$

$$= q_3 b + q_3 \rho_0 \left[ \frac{\pi}{4} \right]$$

第 0.3 - 16 図 応力・モーメント図

$$\begin{aligned}
 \text{領域 III} \quad N_{\text{III}} &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} q_2 \cos \varphi \cdot \rho_0 d\varphi = \int_0^{\frac{\pi}{2}} q_3 \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot \rho_0 d\varphi \\
 &= q_3 \rho_0 \left[ -\frac{1}{4} \cos 2\varphi \right]_0^{\frac{\pi}{2}} = \frac{1}{2} q_3 \rho_0 \dots\dots\dots (63-37)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{\text{III}} &= M_0 + N_1 (\rho_0 + x) - \int_0^{\frac{\pi}{2}} q_2 \rho_0 d\varphi \cdot (\rho_0 \cos \varphi + x \sin \varphi) - \int_0^x q_3 x dx \\
 &= M_0 + (q_3 b + \frac{\pi}{4} q_3 \rho_0) (\rho_0 + x) - \rho_0 q_3 \left( \frac{\rho_0}{2} + \frac{\pi}{4} x \right) - \frac{1}{2} q_3 x^2 \dots\dots (63-38)
 \end{aligned}$$

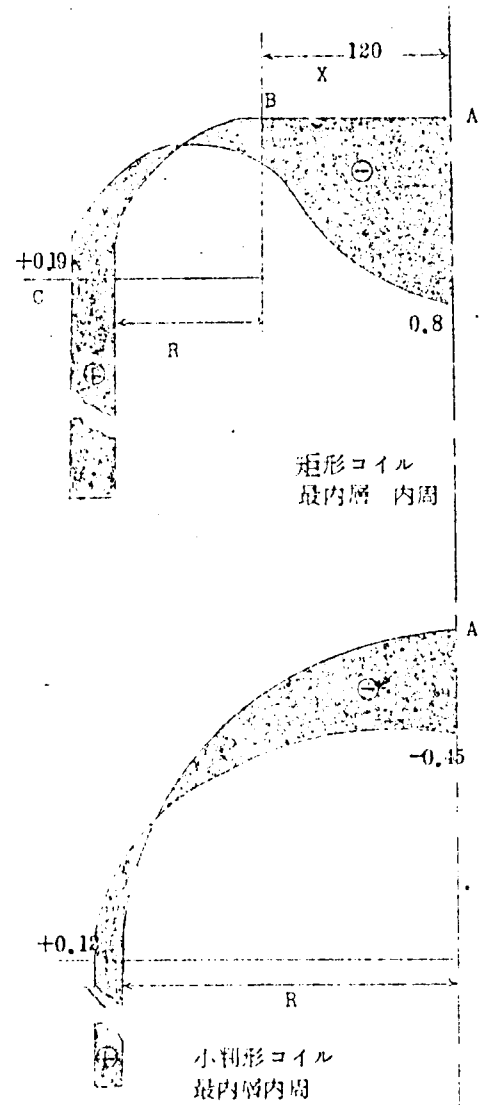
計算機のパログラムを開発し、#8 コイルについて計算させた。この場合も前項同様、最内層の結果について検討してみる。荷重はコイルエンドの直線部に  $100 \frac{\text{Kg}}{\text{M}}$ 、R 部は  $100 \cdot \sin \varphi \frac{\text{Kg}}{\text{M}}$ 、鉄心内直線部は 0、で計算した。結果は右図に示すとおりであるが、最大応力の表れるのは直線部中央である。短絡強度を増強する一案として、コイルエンド直線部が存在しない小判形コイルがある。これについて計算した結果では、最大応力は矩形コイルと同様コイルエンド中央に現われ、その大きさは矩形コイルの 56% である。ただし、小判形コイルの荷重分布はコイルエンド中央において  $100 \frac{\text{Kg}}{\text{M}}$  とした。垂直方向電磁力は同形コイルでは垂直方向のスレに比例して発生するので、矩形、小判二種のコイルにおいて同じスレとすれば、中央部における電磁力は同じとなり、上記の条件となるわけである。このとき垂直方向電磁力の総和は鉄心内コイルの引張り力となるが、上述の条件下では

矩形  $0.19 \frac{\text{Kg}}{\pi k}$

小判  $0.12 \frac{\text{Kg}}{\pi k}$

となり、矩形コイルの方が総計としては 58% 大きい電磁力を受けていることになる。

参考として中央層、最外層について計算した結果を掲げる。



第 63-17 図 応力分布図

第63-1 表 応力分布表 (kg/cm)

コイル	観察点	最内層		中央層		最外層	
		内周	外周	内周	外周	内周	外周
矩形	A点 応力	-0.80	+0.80	-1.55	+1.56	-2.44	+2.45
	B点 "	-0.16	+0.15	-0.92	+0.91	-1.80	-1.81
	C点 "	+0.19	-0.17	+0.43	-0.44	+0.90	-0.85
小判形	A点 "	-0.45	+0.46	-0.94	+0.95	-1.60	+1.59
	C点 "	+0.12	-0.10	+0.33	-0.30	+0.69	-0.65

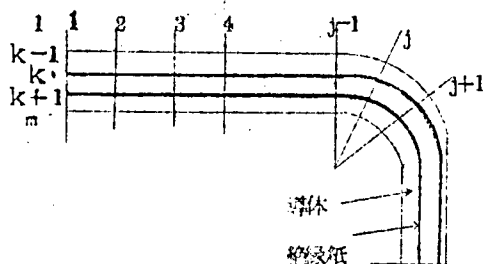
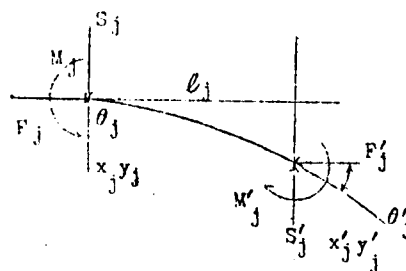
## 6.3.6 多層曲り梁の数値解法

分布荷重に対する曲り梁理論の所では、コイル全体に働く垂直方向電磁力をターン数で割つただけの力が最内層に働くと考え、最内層1ターンの寸法を用いて曲り梁理論を使用すれば、R部に現われる応力は、計算値と実測が良く一致したことをのべたが、この考えかたもまだ完全なものではないので、この章では曲り梁と多層の条件を同時に考えにいった解法を展開することとする。

実際の矩形コイルは渦巻状であるが、これを考にいれると問題は非常にむづかしくなるので矩形のリンクが多層重なつたものと仮定する。電磁力はコイル中心に対して対称に働くと仮定する。したがつて解析はリンクの $1/4$ をとつて考えればよい。

曲する梁の応力や撓みを計算する場合、形状が単純であつたり層数が1層の場合には、6.3.4項のように一つのもので取り扱うことができるが、今回はそれが、不可能であるので、曲線を適当な区間に分割し、その区間内では直線梁であるとして取り扱い、この梁は単純曲げ引張り圧縮、およびねじり弾性にもとずいて変形し、隣接する直線梁の境界条件を決定するとして問題を解く。このとき、相隣る区間で、区間内に固定した座標同志はかならずしも一致しないので、座標変換をする必要がある。

下図は多層曲り梁に上述の方法を適用したときの図で、任意のk層目のj区分について梁の力学的平衡条件を考えると次式が成立する。

A)  $1/4$  曲り梁

B) 平衡条件

ただし S : 剪断力  $\uparrow$  + 右端  $S = S_H + G$   
 F : 軸力  $\rightarrow$  + 左端  
 M : 曲げモーメント  $\curvearrowright$  + 左端  
 $\theta$  : 角変位  $\curvearrowright$  +  
 X, y : 偏位  $\downarrow$  +  
 G : 外力  $\downarrow$  + (市磁力及絶縁紙よりの反力)  
 S<sub>H</sub> : 剪断力  $\downarrow$  + 左端

## 第63-18図 多層曲り梁説明図

$$\begin{aligned} \text{軸力} & F'_j = F_j \\ \text{外力と剪断力} & S'_j = S_j \\ \text{モーメント} & M'_j = M_j + S_j \ell_j \\ \text{横方向変位} & X'_j = X_j - a_F F_j \\ \text{縦方向変位} & y'_j = y_j - \ell_j \theta_j + b_M M'_j + b_F S'_j \\ \text{角変位} & \theta'_j = \theta_j + C_F S'_j - C_M M_j \end{aligned}$$

$a_F, b_F, C_F, b_M, C_M$  等は係数で下記の如く求められる。

1)  $a_F$ 

梁の断面積を A , ヤング率 E , 軸力を P とすれば

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{P}{EA}$$

$$\delta = \varepsilon \ell_j = \frac{\ell_j}{EA} P \quad \delta : \text{偏位}$$

$$\therefore a_F = \frac{\ell_j}{EA}$$

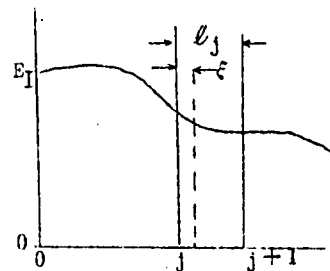
II)  $b_F, C_F, b_M, C_M$  は面積モーメント法により下のように求められる。一般に EI は下図の如く変化するが、こゝでは EI は一定とする。

$$b_F = \int_0^{\ell_j} \frac{\xi^2}{EI} d\xi = \frac{\ell_j^3}{3EI}$$

$$C_F = \int_0^{\ell_j} \frac{\xi}{EI} d\xi = \frac{\ell_j^2}{2EI}$$

$$b_M = \int_0^{\ell_j} \frac{\xi}{EI} d\xi = \frac{\ell_j^2}{2EI}$$

$$C_M = \frac{d\xi}{EI} = \frac{\ell_j}{EI}$$



第63-19図 EI図

なお，前述の平衡条件式において，厳密にはもつと多くの成分が派生してくるが微量として省略した。

以上の係数を代入して各式をまとめると

$$\begin{bmatrix} X'_j \\ Y'_j \\ \theta'_j \\ F'_j \\ S'_j \\ M'_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -\frac{\ell_j}{EA} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -\ell_j & 0 & \frac{\ell_j^3}{6EI} & \frac{\ell_j^2}{2EI} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -\frac{\ell_j^3}{2EI} & -\frac{\ell_j}{EI} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ell_j & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ \theta_j \\ F_j \\ S_j \\ M_j \end{bmatrix} \quad (63-39)$$

上式のマトリックス ( $E_j$ ) を 弾性マトリックス と云う。

つぎに座標変換マトリックスについて考える。

いま右図のように， $(x_j, y_j)$  座標系に

おける各成分を， $(x_{j+1}, y_{j+1})$  座標系に

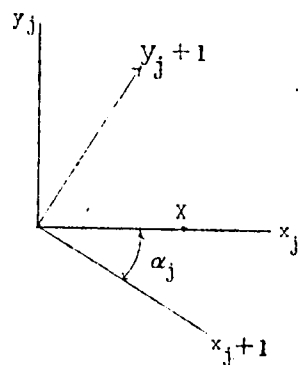
移すときを考えてみるに， $x_j$  軸上の一点

$X_j$  は  $x_{j+1}$  軸上では

$$X_{j+1} = X_j \cos \alpha_j$$

となり  $y_{j+1}$  成分として次の量が発生する。

$$y_{j+1} = x_j \sin \alpha_j$$



第 63-20 図 座標変換

同様のことは  $y_j, F_j, S_j$  などについてもいえるが，モーメントと角変化は影響を受けない。

これらの関係を一つの式で表現するとつぎのようになる。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ \theta \\ F \\ S \\ M \end{bmatrix}_{j+1} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_j & +\sin \alpha_j & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha_j & \cos \alpha_j & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_j & +\sin \alpha_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \alpha_j & \cos \alpha_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ \theta \\ F \\ S \\ M \end{bmatrix}_j$$

上式のマトリックス ( $T_j$ ) を座標変換マトリックスという。

また弾性マトリックス  $E_j$  と座標変換マトリックス  $T_j$  との積を弾性伝達マトリックス  $M_j$  という

$$M_j = T_j \cdot E_j$$

$$\therefore \begin{pmatrix} X \\ Y \\ \theta \\ F \\ S \\ M \end{pmatrix}_{j+1} = M_j \begin{pmatrix} X \\ Y \\ \theta \\ F \\ S \\ M \end{pmatrix}_j \quad \dots\dots\dots (63-41)$$

したがって始点における  $X, Y, \theta, F, S, M$  の値が定まれば、任意の点におけるこれらの諸量は次式であたえられる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ \theta \\ F \\ S \\ M \end{pmatrix}_j = M_1 \cdot M_2 \cdot \dots \cdot M_{j-1} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ \theta \\ F \\ S \\ M \end{pmatrix}_1 \quad \dots\dots\dots (63-42)$$

始点における諸量は考えている領域が対称な4ヶの領域の1つであることより決定することができる。たとえば右図において、 $(p, q)$  なる点に外力  $q$  が加えられた場合について考える。力学的つりあいの条件より

$$F_1 = q \cos \varphi \quad \ell : \text{周長}$$

$$F_n = q \sin \varphi$$

$$S_1 = S_n = 0$$

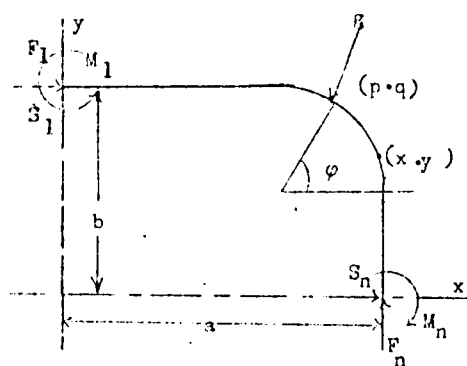
つぎに不静定モーメント  $M_1$  を求める。

梁の上の任意の点  $(x, y)$  のモーメント  $M$  は

$$0 < x < p, \quad b > y > q \quad \text{では}$$

$$M = M_0 - F_1 (b - y)$$

$$p \leq x \leq a \quad q \geq y \geq 0 \quad \text{では}$$



第63-21図 曲り梁

$$M = M_0 - F_1 (b-y) + g \cos \varphi \cdot (q-y) + g \sin \varphi \cdot (x-p)$$

最小仕事の原理より次式が成立する

$$\int_0^{\ell} M \, ds = 0 \quad \ell : \text{周長}$$

ただし、曲げモーメントによるポテンシャルエネルギーのみを考え、断面係数は一定とした。

ゆえに外力  $g$  の印加点 ( $p; q$ ) までの周長を  $\ell_1$  とすれば

$$\begin{aligned} & \int_0^{\ell} (M_0 - F_1 (b-y)) \, ds + \int_{\ell_1}^{\ell} \{ +g \cos \varphi \cdot (q-y) + g \sin \varphi \cdot (x-p) \} \, ds \\ \therefore M_0 = & \frac{1}{\ell} \{ +F_1 \int_0^{\ell} (b-y) \, ds + \int_{\ell_1}^{\ell} g \{ \cos \varphi \cdot (q-y) + \sin \varphi \cdot (x-p) \} \, ds \} \end{aligned}$$

..... (63-43)

以上は外力印加点が一点の場合であるが、周長全域にわたって分布しているときにはさらにも  
ういちど周辺に沿って積分を行なう。

$X, y, \theta$  に関しては、始点を 0 と定めても一般性を失わないので、そのように定める。

$$X=0, \quad y=0, \quad \theta=0.$$

つぎに多層であるための制約条件がある。第  $k$  片に働く外力  $G_{kj}$  は自分自身に働く電磁力のほかに、上、下層の絶縁紙を介してつたえられる隣接層からの反力がある。電磁力が働かないときの各層間絶縁紙の厚みを  $\eta_k$  とし、荷重されたことによる変化量を  $\Delta \eta_k$  とすると

$$\text{紙からの反力} = K \frac{\Delta \eta_{k-1}}{\eta_{k-1}} - K \frac{\Delta \eta_k}{\eta_k}$$

ここに  $K$  は、絶縁紙の撓みより圧力を決定する函数形である。そこで電磁力を  $FM_{kj}$  とすると外力は  $G_{kj}$  は

$$G_{kj} = FM_{kj} + K \frac{\Delta \eta_{k-1}}{\eta_{k-1}} - K \frac{\Delta \eta_k}{\eta_k}$$

となる。また端部においては各層の軸力を  $F_{k1}, F_{kn}$  とすると

$$\sum_{k=1}^n F_{k1} = X \text{ 軸に平行な電磁力成分の総和}$$

$$\sum_{k=1}^n F_{kn} = Y \text{ 軸に平行な電磁力成分の総和}$$

の制約条件がある。

#### 6.4 プレスボードの機械的性質

外鉄形変圧器にとつて、プレスボードは絶縁構造上欠くべからざるものであると同時に、コイル群の機械的性質を決定する要素でもある。変圧器は一見鉄と銅のかたまりのように見えるが、それは外部から見た場合のことであつて、一旦内部に立入り、自分自身が発生する電磁力

に対する強度を考えるとときには，外見に似て強い物の代表例である紙製品に機械的強度を頼らなければならないという，不思議な現象なのである。また変圧器の組立の立場からみても，圧縮特性はいろいろ問題のあるところである。こう考えるとプレスボードの機械的性質は変圧器の強度にきわめて重要な役割をはたすものであるにもかかわらず，あまり発表もされておらず，暗中模索の段階である。

#### 6.4.1 静的性質

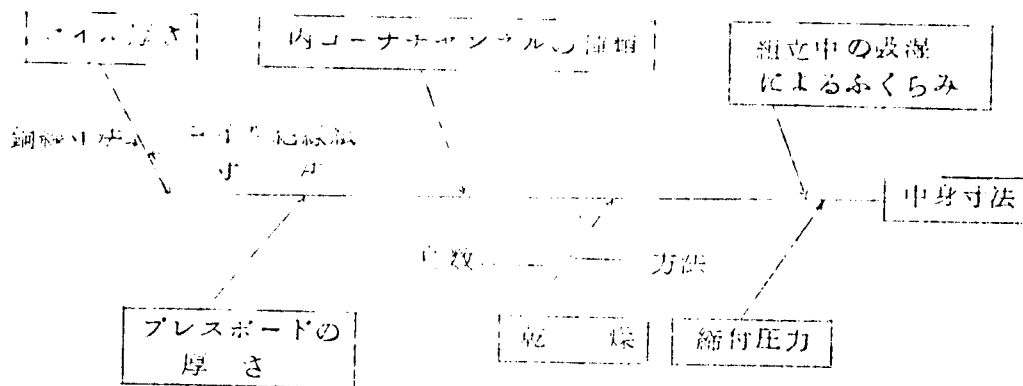
プレスボードの静的性質のなかで，変圧器組立に最も重要な事項は

プレスボードの厚さ

乾燥による厚さの変化

縮付圧力と縮み特性

である。外鉄形変圧器は周知のように，鉄心窓枠寸法内にコイル群が適当な縮付圧力に縮付けられて組上らなければならない。したがって，設計段階で精度良く窓枠寸法を算出するためには，コイル群としての中身縮付寸法に最も影響のある因子に関する情報を十分つかんでいる必要がある。

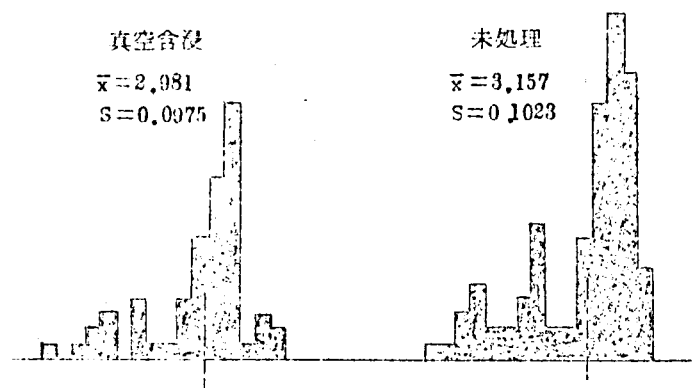


第6.4-1図 中身寸法に影響する因子

上図は中身寸法に影響をあたえる因子の構成表であるが，コイル厚さはコイル群内に占める比率が小さいうえに，コイル厚さの大部分を占める銅線は金銅材料である上にダイスによる線引き加工されたものであるので，寸法精度はプレスボードに比してはるかによく，また縮付圧力程度では非圧縮性と考えてよいので問題とならない。設計ではコイルのふくらみとして一枚毎に  $1\text{mm}$  を考えているが，超大形の変圧器でもコイル枚数は  $50$  枚程度であるので，丸々間違つても  $50\text{mm}$  にすぎない。これに反しプレスボードは，大形，超高圧の変圧器になると横み厚も  $1000\text{mm}$  を越え，わずかの特性の推定誤りが重大な影響をおよぼす。



厚さの管理は、製造技術的見地から入荷ロットごとに抜取り検査が行なわれ、設計にデーターを供給している。第64-2図は某月某日入荷のプレスボード大板一枚より100×100の板100枚程を作り、一枚の内の4隅および中央の厚さを測定し平均したものを、その板の代表厚さとして画いたヒストグラムである。



第64-2図 プレスボードの厚さ

平均厚さ 3.157mm

標準偏差 0.1023mm

であるが、分布の形は正規分布ではなく、厚いほうにすそを引くポアツソン分布に近い形である。厚いほうの最大は平均の約10%増しである。紙製品であるからやむをえぬことかもしれぬがずいぶんと大きな開きである。

上記のサンプルをモデルトランスのコイル母と一諸に釜に入れ、真空乾燥油含浸を行なう、いわゆるグループ乾燥を行なつてのち、未処理のものと同じ割りかたをしたところ

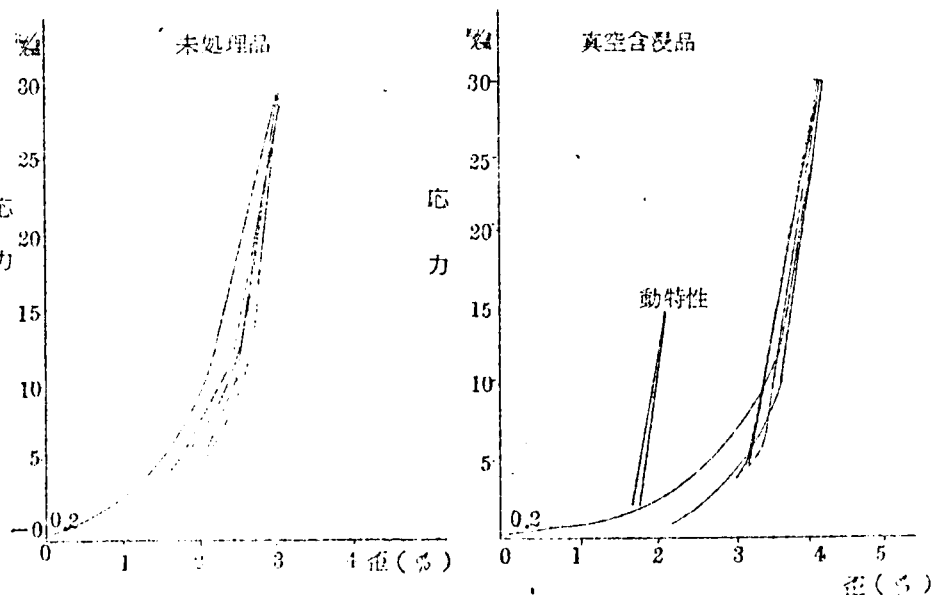
平均厚さ 2.981mm

標準偏差 0.0975mm

と平均値において5.5%収縮している。分布はわずかに改善され正規分布に近くなつてゐる。

圧縮特性は、100TON万能試験機を使用して、未処理品、および真空乾燥油含浸した100

×100のサンプルについて行なつた。第64-4図はその結果である。プレスボードは、100×100のよ  
うに割合小さなサンプルで  
もわずかなそりをもつてい  
るので、圧縮荷重0の状態  
を基準にすると撓み量は非  
常に大きくなり、実情にも  
そくさないで0.2Kg/cm<sup>2</sup>に  
加圧したところを基準とし

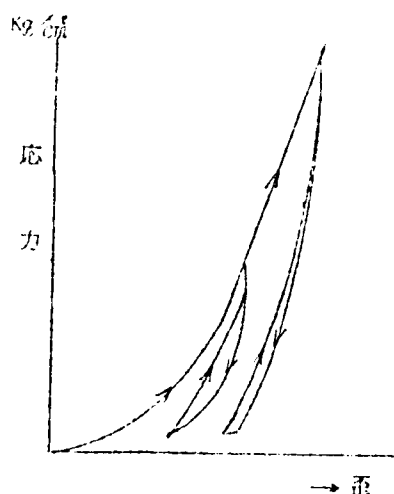


第64-4図 プレスボードの応力-歪特性

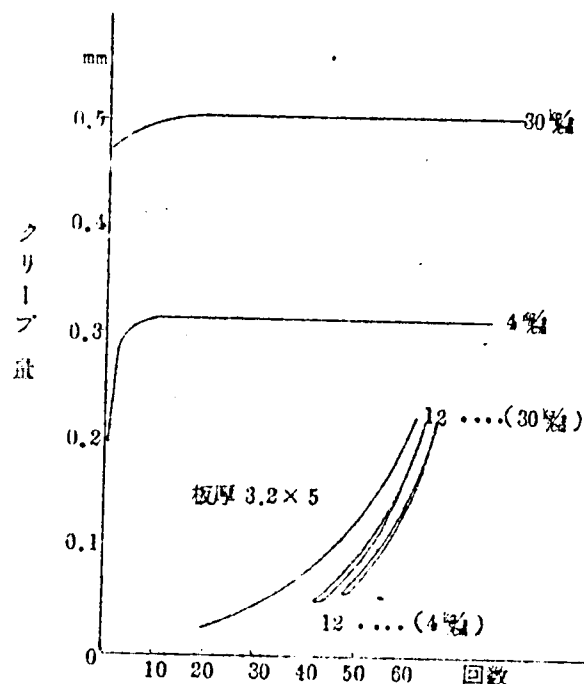
た。 $0.2 \text{ Kg/cm}^2$ を選んだのは、マイクロゲージの面圧は $500 \sim 600 \text{ g}$ であり、直径 $6 \text{ mm}$ より計算すると、 $1.76 \sim 2.12 \text{ Kg/cm}^2$ となり、かなり圧力で押えて測定しているのであるが、実情と合せるためには、そりがなくなる程度としてこの値をえらんだ。応力-歪特性は顕著な非直線性と残留歪の残る性質を持つ。荷重の低い間は大きな撓みを生じ、すなわち柔い性質を持つが、荷重が大きくなるにしたがって剛性はますます高くなっていく。荷重をゆるめると残留歪が残るために、下降曲線は最早上昇と同じ径路をたどらず、曲線は口を開けることとなる。

ふたたび荷重を増すと、初回の上昇下降の間に入る曲線にそつて上昇し、最大荷重点はほとんど同じ点になる。二回目の下降以後はほとんどその前回と同じ径路をたどる。

このように初回の加圧時の曲線だけが離れた特性を示すのは、プレスボードの性質のなかに可塑性の部分があつて、これが殺されていくためと考えられる。可塑的な部分とは、たとえばプレスボードの内に存在するポーラスな部分というような物であつて、その部分の強度はいろいろの段階があつて、たとえば $16 \text{ Kg/cm}^2$ でつぶれるものもあれば、 $30 \text{ Kg/cm}^2$ まで持つ部分もあり、まちまちである。そこで $16 \text{ Kg/cm}^2$ までのくりかえして特性がおちついても、さらに荷重を増して繰り返し加圧減圧を行なうと、 $16 \text{ Kg/cm}^2$ を越えた初回のふんはやはり処女曲線の性格を帯び、繰り返してもふたたび通ることはない。逆に、最初に大きな荷重点まで加圧してしまふと、それ以下の荷重に対しては常に同じ径路をたどることになる。



第6.4-6図 プレスボードの履歴現象



第6.4-7図 プレスボードのクリープ

可塑的性質は時間的特性も持つており、たとえば  $30 \text{ Kg/cm}^2$  に長時間保つと板厚は徐々に減少していく。上図は  $4 \text{ Kg/cm}^2 \sim 30 \text{ Kg/cm}^2$  を繰り返す荷重したときの板厚の変化を示したものであるが、初回のタワミ量よりも回数を繰り返すにしたがい、わずかつタワミは増加していることがうかがえる。ただこの増加も10回程度でなくなっている。この繰り返し試験は一回の上下に約1分を要したが、もしも繰り返しをもつともつと早く行なうならば、初回のタワミ量は少く、毎回の増分はもつと多くなり、多数回ののちに、ある最終値に収斂するであろうと推定される。プレスボードは真空乾燥油含浸を行なうと未処理の場合と大分特性がかわってくる。

6.4-4 図で両者を比較してみると、

1. 同一荷重に対して撓み量は油浸のもののほうが大きい。静的な剛性（荷重／歪）は油浸の方が柔くなる。とくに荷重の小さい間における変化が大きい。変圧器組立時の締付圧力は普通数  $\text{Kg/cm}^2$  であるので、この領域における特性の変化は組立時の締付代の算出には大きな影響をもつ。
2. 残留撓について検討してみると、未処理品のほうが大きい。ただし検討の方法としてはつぎのように行なつた。変圧器で残留歪の問題になるのは、短絡後の締付力のゆるみである。変圧器のコイル群は、鉄心窓枠寸法内に締付けられており、窓枠寸法は絶対不変のものであるから、同一歪量における処女上昇曲線と繰返し降下曲線の荷重の差が緩みとなつて現われるので、残留撓みの大小の判断はこの方法によつた。処女曲線上、 $5, 10, 15, 20, 25 \text{ Kg/cm}^2$  における緩みの平均は

$$\text{未処理: } 6 \text{ Kg/cm}^2, \quad \text{油浸: } 4 \text{ Kg/cm}^2$$

である。

3. 荷重が  $5 \text{ Kg/cm}^2$  以上になると、繰返し曲線の incremental な剛性（荷重の微小変化に対する歪みの微小変化分、即曲線の傾斜）は、処理の有無にかかわらず同じになる。これは処女曲線の上昇過程において、プレスボードの原材料であるセルローズの繊維のうちにはいりこんでいる油、空気、空間などが押しつぶされ、セルローズ本来の性質がでてくるためと考えられる。

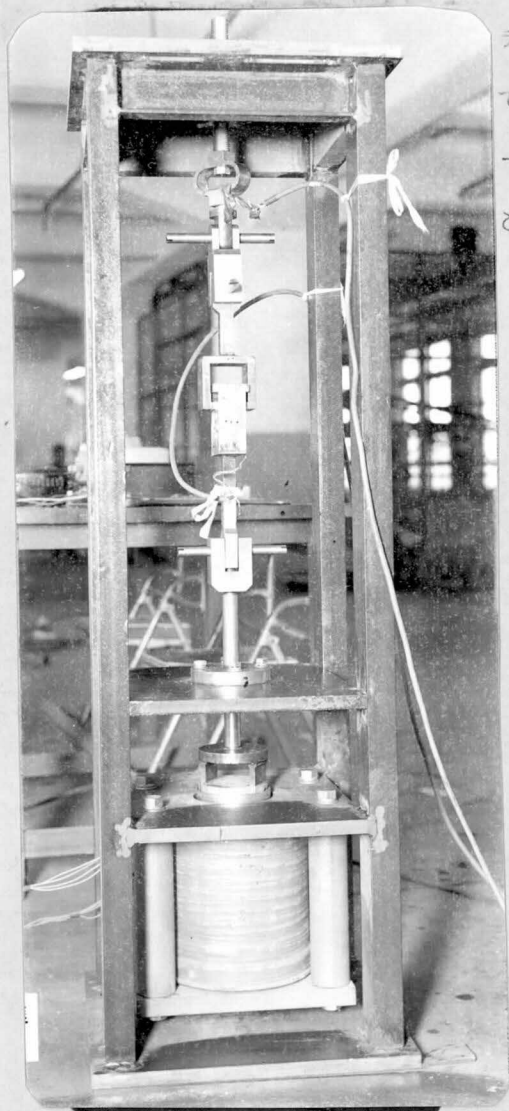
プレスボードを積重ねたときの厚さに関しきついたところを附言する。

従来の考え方では、プレスボードを積重ねたものの厚さは、一枚ごとの平均厚さを枚数分だけ加えればよいように考えていたが、この考えかたはどうもまちがいらしい。実験データによれば、マイクロゲージで求めた一枚内5点の平均厚さを枚数分だけ加えた計算上の積み厚さになぜまで押すには、荷重はマイクロゲージの面圧  $2 \text{ Kg/cm}^2$  よりもはるかに大きい数  $\text{Kg/cm}^2$  を要する。プレスボードを積重ねた場合、ある点で凸と凹とがむきあつても、そのすぐとなりとで凸と凸とがむきあえば、厚さは平均よりも当然厚くなるわけで、ボアツソン分布のような厚さ分布をも

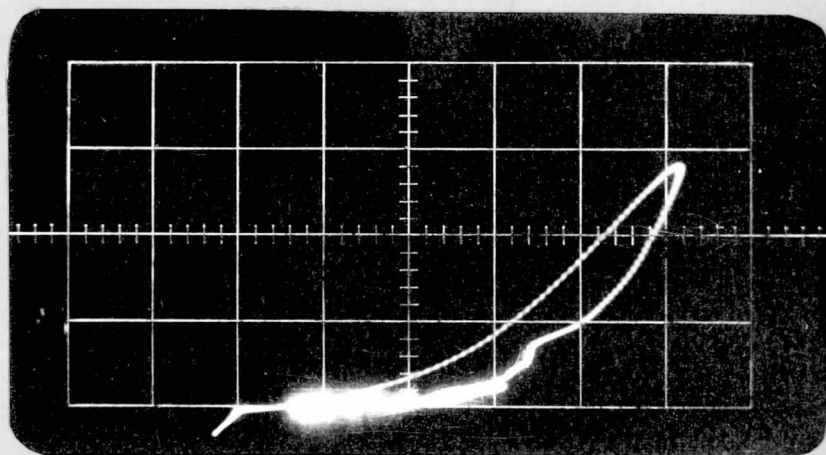
つものの積重ねの理論的究明をおこなう必要がある。

#### 6.4.2 動的性質

静的特性の考察であきらかにされたように、プレスボードの機械的性質は塑性変形をおこなう部分と、弾性変形をする部分からなると考えられるが、短絡電磁力のように急激に変化する外力に対しては、塑性変形的性質は影をひそめ、弾性的性質が顕著に現われるものと予測されるが、実験結果はこの推測の正しいことを実証している。第6.4-4図の油浸プレスボードの静的性質と一諸に書きいれてあるように、動的な特性はヒステリシスも少なく、そのうえ傾斜も静的特性の高い荷重における下降特性に近い。このような性質の現れるのは、非常に早い荷重の変化に対しては、セルローズの繊維の間にはいりこんでいる油は圧縮されてもそとに逃げだす時間的余裕がないために、非圧縮性弾性体として働き、セルローズ基材そのものの弾性に近い性質が表れるものと考えられる。試験装置は左下に示すように銅線の動的試験装置のアタッチメントだけを取替えたものである。下図は動特性の一例で40×50の真空乾燥油含浸の処女曲線である。プレスボードの動特性に関する発表は皆無であつてオシロの掲載がこれが初とおもう。



第6.4-8 プレスボード動特性試験装置



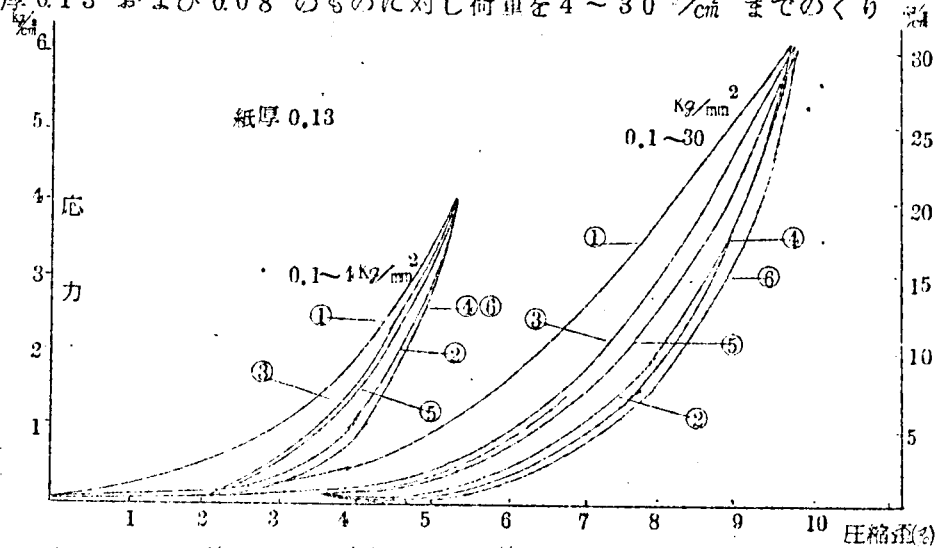
第6.4-9 図 プレスボードの動特性  
(タテ: 荷重  $5 \text{ Kg/DV}$  .ヨコ: 歪  $330 \text{ }^{\circ}/\text{D}$ )

## 6.5 コイル絶縁紙の機械的性質

コイル絶縁紙の機械的性質で問題となるのは、圧縮特性と物理的強度である。

圧縮特性は、コイル群組立のとき締付によるちぎみ代に効いてくる量であるが、紙厚全部を加算しても、その量はプレスボードに比してきわめて小さいので問題とするにたらない。重大な影響をあたえるのは、多層に巻かれたターン間、並列導体間に介入された力の伝達機構の一部となつた場合である。紙の機械的性質いかんによつて、多層の梁の等価断面二次モーメントとか、多層の等価的な考え方が変わってくるものと考えられるが、この方面の研究はまだ端緒についたばかりで、充分研究されておらず、こんどの問題である。紙の圧縮特性の測定結果は第6.5-1図に示すとおりで、紙厚0.13 および0.08 のものに対し荷重を4~30  $\text{Kg/cm}^2$  までのくりかえし特性を測定した。

プレスボードに比較して撓みのはも大きく、また残留撓みもはるかに大きい。定性的な性質はプレスボードの場合とまったく同様であつて、処女曲線、繰返し曲線の別がある。



第6.5-1図 コイル絶縁紙の荷重-撓み特性

物理的強度を要求されるのは交流短絡試験の点検結果のところ述べてのように、大きな電磁力が働いたコイルでは、コイル素線の変形波打ちが発生し、絶縁紙がほうほう裂けており、またカルタの角で破られたところがあつた。これらはターン間短絡の誘因となるもので、好ましくない。機械的破壊力の高い物程良いわけであるが、現在使用しているものの強度はおつぎのとおりである。

第6.5-1表 0.08コイル絶縁紙強度

試 験 項 目	未処理	気中劣化	油中劣化
引張り強度 (Kg)	13.1	8.5	5.0
15×150 (mm) ショツパー引張り試験機	3.07	2.85	1.9
破裂強度 (Kg/cm <sup>2</sup> )	2.6	0.7	0.2
30×150 (mm) Aschroft 破裂試験機	〃	〃	〃
耐折強度 (回)	528	1.5	1
15×100 (mm) MIT形耐折強度試験器	262	5.2	1
引裂強度	64.7	19.8	
60×75 (mm) エルメンドルフ引裂試験器	79.3	34.8	

気中劣化とは 150℃ 7日間 気中

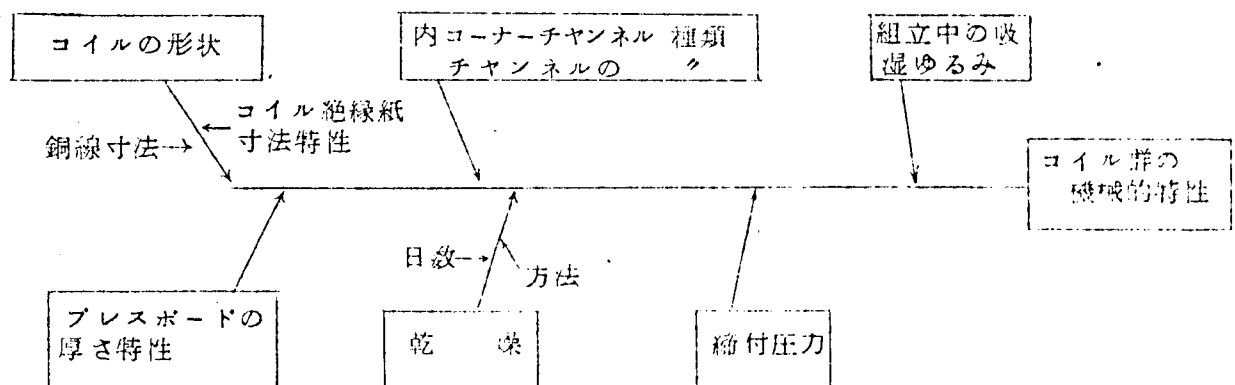
油中劣化とは 150℃ 7日間 油中

上段： 縦， 下段： 横，

## 6.6 コイル群の機械的性質

外鉄形変圧器を組立てる段階で問題となるものは一つに締付けがある。外鉄形変圧器はその名の示すように鉄心窓の中にコイル群が入っているのであるが、コイル群に適当な締付け荷重をかけた状態で鉄心窓内にピッタリ入れるためには、コイル群としての圧縮荷重に対する撓み特性を、充分に知っておく必要がある。さらにまた本研究の目的である変圧器の短絡強度を検討する場合にも、この性質は重要な事項である。変圧器の短絡強度とは、すなわちコイルおよびコイル群の機械的強度である。なぜならば、短絡電磁力はコイル群内に発生するものであつて、鉄心およびタンクなどの強度はコイル群に比して比較にならぬほど強靱であつて、問題とするにたらぬからである。

プレスボード単独の圧縮特性は6.4節でのべたところであるが、コイル群の性質となるとプレスボード単独の特性とはまたちがつた特性をもつてであろうことは容易に推測のつくところである。コイル群の性質の要因分析をおこなうと、さきにもかゝげたように次図のようになる。



第6.6-1図 要因分析図

この図からもあきらかなように、圧縮特性だけにかぎって考えても、コイル、プレスボード、チャンネル、乾燥の4つの要因がふくまれているわけである。そこでこれらの要因がどのように作用しているかを調べるために、コイル群の圧縮試験を100TON 万能試験機を用いて行なつた。コイル群を標準工作法にしたがつてグループ乾燥したもの2相分と、乾燥前のもの1相分について試験を行なつた。試験結果は第6.6-2図に示すとおりであるが、これを検討して

みることにする。

# 1. コイル群寸法

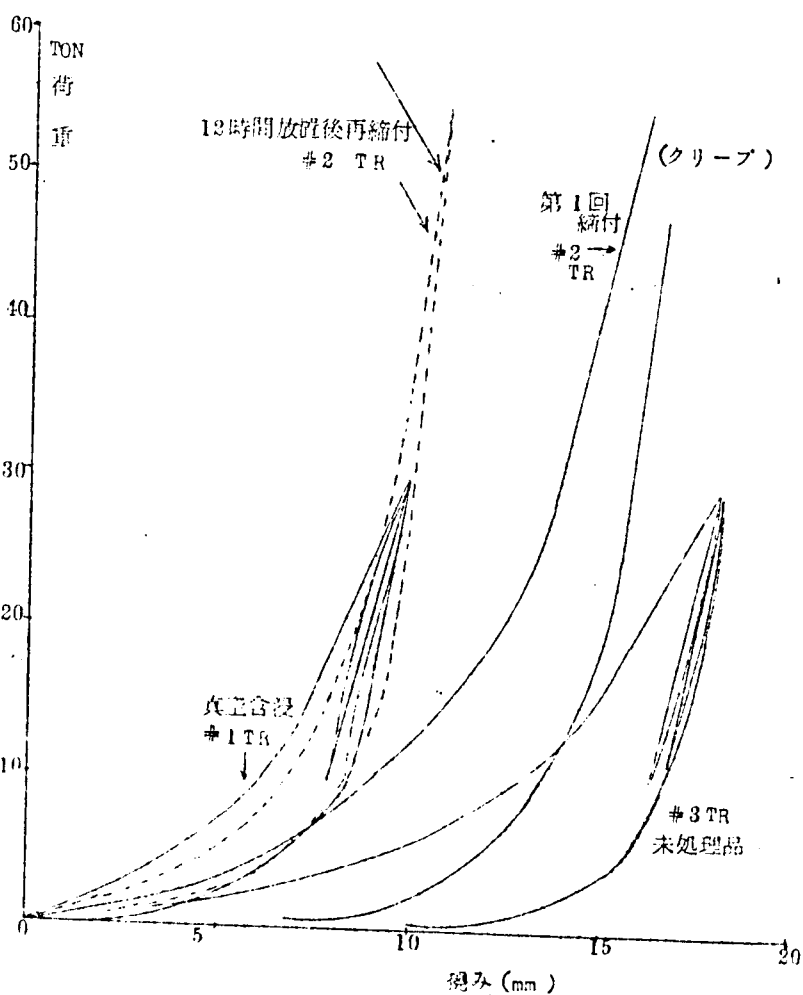
加圧締付けまえのコイル群の厚み寸法は、第2章モデルトランスの図面によれば

プレスボード 142.4

コイル厚み 91.28  
(8枚分)

中身締付前寸法 233.62

であるが、実際にできあがつたコイル寸法を、コイル中央および両端とけ反対のコイルエンド側で測定したものの平均はつぎのとおりである。



第66-2図 コイル群の締付け

#1	TR	真空乾燥油含浸	217.84
#2	TR	〃	221.87
#3	TR	未処理	249.82

この場合コイルは完全な無負荷ではなくて、約150 kgの押え板が上に乗った状態である。  
(コイル及押え板の総重量: 850kg)。

未処理品の厚さが設計値よりは大巾に大きいのは、プレスボードの応力-変特性からも明かなように、未処理品は荷重の小さい範囲では見掛け上の剛性が大きいために、チャンネルの溝底巾の余分な大きさによる空間が、850 kg程度ではなくなるために寸法が大き目にでているのではないかと考える。

油浸したものは、プレスボードの特性が柔くなり、かつプレスボード自身もやせるので、未処理品よりも薄くなっている。ただ設計寸法よりも10以上マイナスにでている理由がわからない。プレスボードの厚さは、32 mmの物の実測値31.57 mmでわずかに1%ほどマイナスにすぎず、プレスボードの総厚みからみて、10以上のマイナスの出所は不明である。

## 2. コイルの圧縮荷重の決定

コン1505では、締付全圧力の最大値及び最小値は

W: 最大ワッシャの巾 (mm)

L: 最大ワッシャの長さ (mm) としての時

$$\text{最大値} = 4 W L \times 10^{-5} \text{ t}$$

$$\text{最小値} = 8 W L \times 10^{-6} \text{ t}$$

である。これは最大ワッシャー面積の単位  $\text{cm}^2$  あたり  $0.8 \sim 4 \text{ Kg/cm}^2$  を意味する。

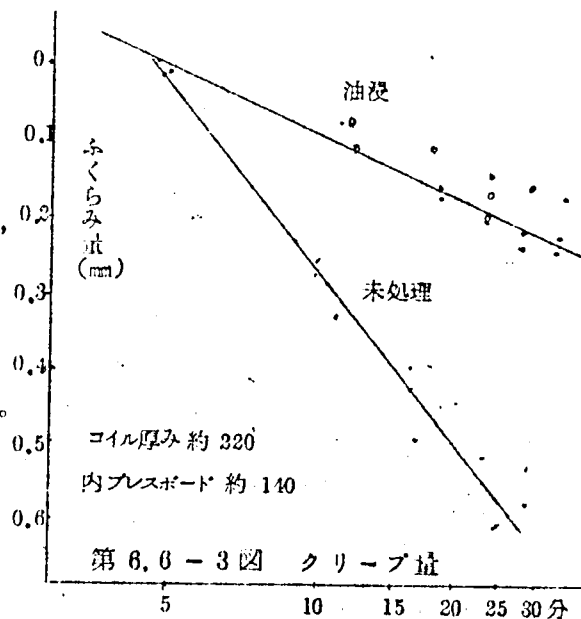
この方式にしたがうと、組立だけに主眼を置いて加圧、締付けるためには、

$$(0.8 \sim 4 \text{ Kg/cm}^2) \times (1365 \times 69.5 \text{ cm}^2) = 76 \text{ t} \sim 38 \text{ t}$$

必要である。また短絡試験時の最大電磁力の推定から計算すると、150 ton ほどになるが、押え板の強度がそんなにないので、30 ton と 55 ton の二様に圧縮した場合の特性を測定した。

## 3. 圧縮特性

第6.6-2図は圧縮特性を示す荷重-撓み曲線であるが、未処理品のほうがグループ乾燥したものに比し撓み量ははるかに大きい。この結果はプレスボード単独の特性とは矛盾する結果のようにみえるが、これはプレスボードの特性が現れたのではなくて、チャンネルなどの特性が顕著に現れたものと解析される。未処理のものは、プレスボード単独の剛性が高いために、チャンネルなどのつゝばりの影響が、10 ton 程度まで強く作用しているためと考えられる。圧縮特性の定性的な傾向はプレスボードの時と同様、処女曲線と繰り返し曲線2本に明瞭に分れ、二回目以後の上昇下降はほとんど同じ道をたどる。しかしいわゆるクリープ現象も明かにみとめられ、くりかえすごとにだんだん縮つていく。また最終開放後のクリープを測定してみると、5分間に油浸で0.3 mm 未処理で0.8 mm 程度のふくらみをみとめる。荷重開放後5分の値をベ-



第 6.6-3 図 クリープ量

スにして、未処理品と油浸品とのクリープ量をプロットしてみると、上図のようになり、時間の対数に対して直線となっており、また未処理品のほうがクリープ量が大きいことがわかる。

変圧器の強度を左右するものに短絡後のコイル締付力のゆるみがあげられる。コイル群においてもプレスボード単体のときと同様、静的特性と動的特性の間には相当開きがあるが、コイ



ル群はプレスボードとことなり簡単に動的な試験を実施することはできない。そこで静的な特性のよいものは動的特性も良好であろうという仮定のもとに考察することは意味があるとおもう。

変圧器コイル群のゆるみはプレスボードのときにも論じたように、コイル寸法を一定としたときの処女曲線と繰返し曲線の差で求められる。もしもクリープという現象がないとすると、いちど短絡に課された変圧器は、その電流以下の電流に対してはもはやゆるまない理屈になるが、試験の結果では初回の短絡によつてふつと大きくゆるみ、回を重ねるにしたがつて減少するが、やはりゆるむ。試験は直流分を最大を含むような位相で行なつたので、短絡サイクルは 5 サイクルほどあつても直流分の電流を考えると、最初のピークにおける電磁力一回だけとほとんど変りないと考えられるので、ゆるみは減るがゆるむのはクリープのためであろう。変圧器のゆるみを少なくするために、上昇曲線と下降曲線の開きはできるだけ小さいほうがよいわけであるが、そのためには締め殺しを行なえばよい。

55 ton までいちど締め、13 時間後に再度締め付特性を測定したところ、ゆるみは約  $1/2$  に減少したが、繰返し曲線のところまで回復されないのは、クリープによつてもとにかえるためであると考えられる。しかし、締め殺しの効果は充分に認められる事実であつて、短絡によるコイル締め付圧力のゆるみをきらうならば、予想される短絡電磁力の最大値まで締め殺すべきである。しかし一般に締め殺しは静的に行ない、短絡は非常に早い現象であるから、同じ荷重造しめる必要はないかもしれない。これらはこんどの研究課題と考える。

#### 4. プレスボードとの特性比較

コイルとコイルとの間にはいわゆるワッシャーとカルタが存在するわけであるが、プレスボードの積厚さを考えると、カルタの占める分ははるかに大きいので、カルタに作用する荷重を算出し、コイル群に組んだ場合の性質とプレスボード単独の特性との比較を行なつてみる。圧縮試験を行なつた状況下では、全荷重を最大ワッシャー寸法で受けると考えるのは少しむりで、コイル面積で考えたほうがよいとおもう。最大と最小のコイルについて考えると締め付力 30 ton として

	最大 (#1)	最小 (#3)
コイル平均長	2720	2715
コイル巾	224	161
コイル面積	6090 $\text{cm}^2$	4370 $\text{cm}^2$
荷重 ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ )	4.93	6.86
カルタ上荷重 ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ )	14.8	20.6

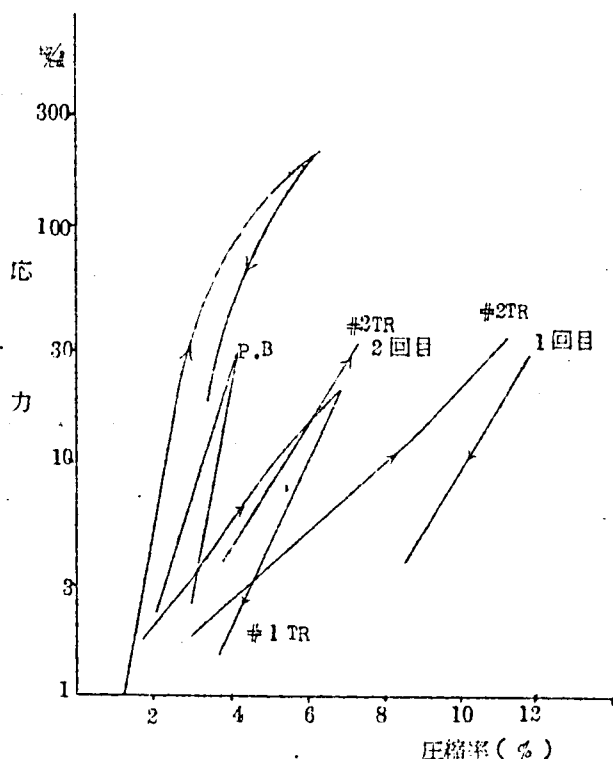
となる。ただしカルタの占める面積はワッシャーの $\frac{1}{3}$ と計算した。

油浸プレスボードの特性とコイル群の圧縮特性をセミログ用紙に書いて比較してみると、右図のようになる。半対数目盛に書いたのは、さきにも触れたように、零荷重のときの厚みはプレスボード、コイル群共、定義することが非常に困難であるので増加率に注目せんとしたためである。

コイル群の撓み特性を考える場合には、非圧縮性の銅線の厚みも含まれるが、プレスボード単独の性質との比較を行うためには、カルタ、ワッシャーのみの積高をベースにして圧縮率を出したほうが妥当であると考えられる。第6.6-4図はプレスボードに関しては、 $200 \text{ Kg/cm}^2$ 、 $30 \text{ Kg/cm}^2$ の荷重まで押した2つのケースを、またコイル群に関しては、30 tonまで押した#1 TR（真空乾燥油浸品）、#2 TRは第1回目55 tonまで押し13時間の放置後、もう一度55 ton迄押し

た結果を記入した。これらの結果をみると

1. プレスボードの特性は $30 \text{ Kg/cm}^2$ 程度まではほとんど直線である。これ以上になると傾斜はゆるくなる。また $200 \text{ Kg/cm}^2$ と $30 \text{ Kg/cm}^2$ の両試験の間では、同一荷重に対する圧縮撓みの量はことなるがグラフの傾斜はほとんど等しい。
2. コイル群に組んだ場合の特性も、試験した範囲ではほぼ直線的傾向をもつが、傾斜はプレスボード単独の場合の $\frac{1}{2}$ 程度である。試験できなかつたので推測であるが、荷重が大きくなればプレスボード単独の特性に等しくなると考えられる。なぜならばプレスボードの特性とコイル群の特性の差は、チャンネルなどが原因するbuild upによるものであるが、荷重が高くなるとこれらのbuild upはつぶされてなくなるはずである。
3. 1回目の下降曲線と2回目の上昇はまったく同じような傾斜である。



第6.6-4図 プレスボードとコイル群の比較

## 67 結 言

1. コイル導体に使用する銅材は、元来構造材として使用される性質のものではないので、機械的には非常に弱い。また加工硬化による機械的性質の変化も大きいので、これまで発表されている耐力の値も一定ではない。耐力は普通0.2%伸びの値をもつて示される慣例であるが、短絡回数の多い変圧器に使用される銅材は、0.01%程度の点で比較したほうがこのまじい。耐力は加工硬化とともに向上するが、焼鈍によつて軟化する。しかし変圧器の運転温度を考えると、加工硬化をあたえることは有効な手段である。加工硬化の度合を調べ、ひいては耐力を求める手段である硬度測定による方法は、非破壊的であるから有効な手法である。
2. 変圧器の短絡強度を決定する要因としての銅材の強度は、静的な耐力の値ではなくて電磁力のように早い周期で変化する外力に対する動的な特性である。特殊な動的試験装置を開発して試験した結果、繰返し同じ大きさの動荷重を印加した場合、残留歪は指数函数的に減少することがわかつた。初期加工硬化を大きくあたえておくと、動的特性も向上するが、紙巻き、巻線による加工硬化だけの場合には（約 $5 \text{ Kg/cm}^2$ の荷重に相当）、動的荷重の値を $8.2 \text{ Kg/cm}^2$ にえらべば、1000回の短絡後永久伸びは0.2%以下に押えることができる。
3. コイル導体は普通複数個の平行導体よりなるが、この導体はカルタによつて両端を拘束された梁として、スパン間に働く主方向電磁力に耐える必要がある。2枚のコイルの短絡によつて実験的に求めた結果によれば、多層梁は各素線が平行に並べられたと仮定して求めた等価断面係数を使用すれば、梁中央に発生する応力を安全値より推定することができる。両端の応力は理論上は中央の2倍であるが、実験結果では1.3倍であつた。完全な固定と考えるは苛酷すぎると考えられる。層間には摩擦力は働かないとして多層梁の理論式を立てた。電子計算機を用いて計算する予定である。
4. 矩形コイルは多層であることと形状が矩形であるためにきわめて複雑な性質をもち、矩形の4隅で固定された4本の多層梁と考へても実験結果とはあまりよい一致をみない。矩形コイルを一層物と考へ、直線と円弧よりなるとして曲り梁の理論を展開し、光弾性の結果と比較したところ、精度よく一致することがわかつたので、多層の概念は各ターンが全く独立に存在しておつて、各ターンにはコイル全体に働く電磁力のターン分の1が働くとして最内層について計算したところ、最大応力の現われるR隅の値は非常によく一致した。しかしコイルの短絡実験結果には不可解な点があり、さらに研究を続ける必要がある。理論的検討は多層と矩形の両条件を同時に加味して行なうべきであるが、理論式だけは確立した。
5. コイル群を形成する素材であるプレスボードの機械的性質は、可塑性と弾性の2つの特性が組合わされている。静的な圧縮試験を行なうと、荷重の低い間は弾性率は低く、荷重の増加

とともに指数函数的に弾性率は増加するが、 $30 \text{ kg/cm}^2$  あたりから一定の値となる。荷重を減少させると、もはや、上昇のときとは同一曲線をとらず、永久撓みがのこることとなる。

さらに荷重を大きくすると先回の下降のときとはことなつた曲線にしたがうが、その差は小さく、簡略化して考えるときには同じと考えてさしつかえない。

動的な特性は、静的特性に比して高い弾性率を示し、荷重の上昇下降によって発生する永久撓みの量も僅少である。

6 コイル絶縁紙の圧縮-撓み特性および機械的破壊特性が明らかとなった。

7 コイル群としての圧縮荷重-撓み特性は、定性的にはプレスボード単独の特性と同類の特性であるが、チャンネルなどの特性が加味されるために剛性が低い（約  $1/2$ ）性質を示す。油含浸を行なうとプレスボードの性質が柔くなるためにチャンネル材による Build up が少なくなり、機械的性質は改善される。いつたん圧縮されたコイル群を再度圧縮すると剛性も高くなり、永久撓みは減少し、特性は改善される。

文 献

- 1) 大谷, 高橋, 平井  
プレスボード及び銅線の機械的性質  
39年 連台大会 611
- 2) E. Stenkvist, L. Torseke  
What is known About the Ability of Large power Transformers to Withstand a Short - Circuit ? Comments on Existing Standards.  
CIGRE No 106 1956
- 3) W. Knaack,  
The Mechanical Stressing of Transformer Windings upon Short-Circuit  
CIGRE No 135 1956
- 4) 小笠原, 松本, 宮入  
長方形リング (ばねつりリング) の応力分布  
鉄道技術研究報告 No 249
- 5) E. Stenkvist  
Short-Circuit Problems in Large Transformers (Report presented in the name of Study Committee on Transformers NO 12 )  
CIGRE No 155 1958
- 6) M. Oyama, C. Fujitaka, J. Tomiyama, S. Asakawa.  
A Study of the Short-Circuit Strength of Trasformer Windings by Means of Models.  
CIGRE No 123 1962
- 7) G. Apetier, G. Bala,  
Experimental Tests for the Measurement of Axial Short-Circuit Forces in Power Transformers  
CIGRE No 128 1962
- 8) L. Torseke,  
Short-Circuit Problems in large Transformers  
CIGRE No 142 1962

## 第7章 電子計算機による検討

変圧器の短絡強度を検討する場合に必要な各コイルに働く電磁力は、抵抗紙模擬法によつて推定することができた。しかもモデル変圧器を使用して短絡試験をおこなつた結果と比較したところ、相当の精度で一致することが判明した。しかしさらに厳密に短絡時に発生する事象を研究する為には、変圧器コイルの運動もあわせ考える必要のあることは、高速度カメラで視測された激しいコイルの運動からも予想のつくことであり、また変圧器の短絡強度は動的に考えずして求めえない、といつても過言ではない。

コイルに働く電磁力の計算であるが、今回使用の 1000 KVA モデル変圧器のように小容量のものでは、コイル枚数も 8 枚と比較的少なく、抵抗紙模擬法でも左程苦勞はないが、たとえば、300 MVA 級の大容量超高压の変圧器になると、コイル枚数も 50 枚ちかくなり、測定による勞力も決して馬鹿にならず、測定後のデータの整理まで含めると 2 人の熟練した作業員で、1 週間～10 日の日時を必要とするものと考えられる。そこでこのような場合の勞力を金額に換算すると費用も相当な額になるうえに、一ケースの計測に 1 週間を要しては種々の案の比較検討をする場合、時間的にも間にあわなくなること必至である。

さらにまたコイルの運動をも加味して短絡強度を検討しようとするためには、多次元の連立微分方程式を解く必要があり、大形電子計算機の使用を当然考えなければならぬ。さいわいにも筆者は IBM 7090 を利用できる環境のもとにあり、これを使用して問題の解明にあたつた。

プログラムを組むにあたり注意したことは、設計段階で入手できるデータ（絶縁組立図、巻線仕様書）をもとにして、設計者が直接計算できるものであること、およびほかの変圧器に関する研究（たとえば変圧器内の電位振動解析）に利用できる<sup>に</sup>ようする事で、このためプログラムは SUBROUTINE TYPE にした。本プログラムは大きくわけてつぎの三部分からなる。

1. 変圧器の組立
2. コイルに働く電磁力計算
3. コイルの運動方程式

プログラムは IBM 709/7090 FORTRAN SYSTEM によつて書いた。この SYSTEM は 周知のことであるので説明は一切省略する。また PROGRAM, FLOW CHART などの説明いづさ<sup>い</sup>も省略した。

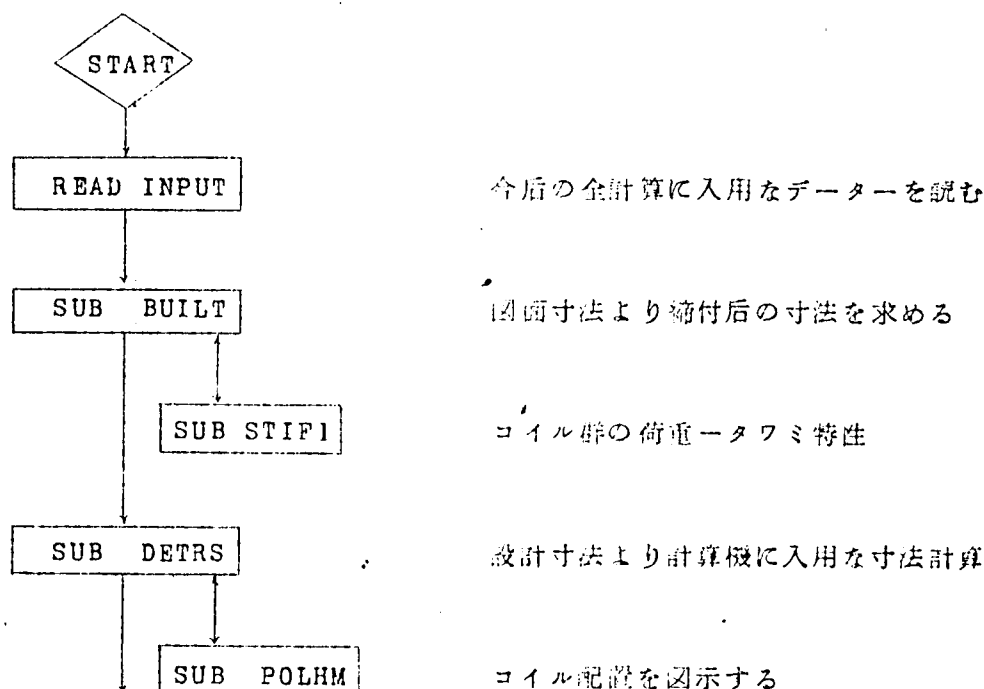
### 7.1. 変圧器の縮付

変圧器の縮付はセン1505で規定されており、この考え方はコイル群を鉄芯窓枠寸法迄締めた場合に縮付荷重が $0.8\text{kg/cm}^2 \sim 4\text{kg/cm}^2$ の間であれば良いと云うことである。(荷重は最大ワッシャー面積に対してである。) 現在設計がもっている設計法は

$\Sigma$  (導体の巾+紙巻絶縁) +  $\Sigma$  (コイル間絶縁寸法) \* 0.975 + 1.0 \* コイル数 = 窓枠寸法  
となるように窓枠寸法を決めておけば、規定に入る組立ができることになっている。

コイル群の機械的性質は第6章において述べたごとく非直線の性質をもち、上式のごとく簡単に律せられる物ではない。変圧器の縮付に対する考え方が組立寸法を出すと云うところにあり、しかも縮付力の規格巾が5倍もあるところに入ればよいときには、現用の設計法でも十分であると思うが、しかし短絡強度を中心にして考えるときは不十分で、やはりコイル群の圧縮に対する特性その物を用いる必要がある。コイルの運動を決定する因子は、コイルの重量、摩擦等による損失係数、バネ常数の3つであるが、重量は変圧器の定格が決ればおのづから決ってくるものであり、摩擦係数は絶縁材料としてプレスボードを使用すればある範囲に入つてしまい、大巾な変化は望めない。ところがバネ常数は、プレスボードの非直線性のために、縮付如何によつては数十倍にも変化するものであり、しかもこの値は初期縮付力によつて大きく変るものであるから、組上り時にどのような縮付圧力にあるかを正確に知ることが、こんどの運動解析の鍵となるものである。

変圧器縮付けのプログラムはつぎのような構成からなる。



### 7.1.1. INPUT

データーの読み込みは最初に全部入用な物は読込んでいる。データーは大きく分けて3つのグループに分類される。

#### 1. 変圧器設計データー

巻線仕様書および絶縁組立図に記載される情報で、たとえばコイル寸法、コイル枚数、絶縁寸法、鉄心窓寸法、変圧器定格などがある。

#### 2. 変圧器組立および試験回路条件

組立条件を決定する縮付トン数および短絡試験を模擬してコイルの運動などを調べる場合の回路条件を与えるもので、投入位相、短絡時間などである。

#### 3. プログラムのコントロール

電磁力の計算と、コイルの運動解析とを同じプログラムで計算させるが、運動解析は毎回行なうわけではないので、外部からコントロールすることにした。このほか電磁力の計算を行なう場合に人間が判断して計算機に教える必要のある、内割れするコイルの予想などがある。

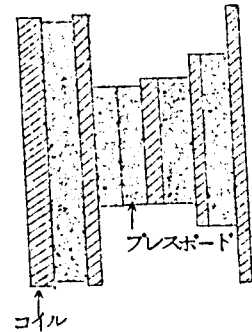
### 7.1.2. SUBROUTINE BUILT

絶縁組立図および巻線仕様書に記載あるデーターを使用して変圧器組立後のコイル群寸法を計算するSUBROUTINEである。このプログラムはコン1505とは反対に、ある縮付総荷重（最大ワッシャ面積にかゝるものとしての）を与えられたときの縮上り寸法を求めるプログラムとなつている。コイル群の圧力-タワミ特性は、100TON万能試験機で求めた特性を理想化したものをSUB STIF1にまとめて呼出している。このようにコンとは反対にプログラムを組んだのは、縮付圧力が変圧器の短絡強度に大きく影響力を持つであろうと予想したためである。組立を主眼にして考えるとときにはコン1505のごとく、組上り寸法を与えて圧力を計算することもこのプログラムのわずかな改造で可能である。

変圧器の絶縁物はワッシャ、カルタ、絶縁紙からなり、縮付けを行なつたときに縮むのはこの三者で、銅線は縮まないのであるが、厚さを考えるとカルタが最も厚く大部分を占めるのでコイル群を縮付けたときは、カルタの単位面積あたりの荷重に相当するタワミ分だけ縮むものとした。カルタは油ダクトを形成するために、ワッシャに千鳥に貼られているのが普通の構造であるが、カルタの占有面積率は約30%である。更に又超高压変圧器はかならず段絶縁を施しているので、高压、低压は云うにおよばず、高压コイル内でもコイル巾には差がある。したがってコイル群を締め付けたとき、総荷重は最大ワッシャ面積で受けるものでない。コイル1枚1枚が非常に柔い物と考えれば複雑な荷重分布をするものと推定されるが、短絡試験時に



おけるコイルの運動を高速度カメラで撮影した結果を見ても、最も巾の広い低圧コイルが、巾の狭い#6コイルと向き合った所でも折れ曲ることなく一つ物として動いていることが認められているので、コイル板は剛性の強い1枚の板であると考え、1枚のコイル上ではいたるところ荷重は一定であるという仮定をもうけた。したがって巾の広いコイルと狭いコイルが向い合ったときは、その間にあるプレスボードは巾の狭いコイルの巾の分だけ荷重を受ける、と仮定した。(右図参照)



第 7.1.-1 図 圧力分布図

全プログラムはすべて奥行き 1 M あたりの計算を行なうものである。(二次元的考察を行なう)。したがって変圧器全体に換算して考えるときには、高圧、低圧全コイルのコイル平均長の全平均を掛けることとする。

### 7.1.3. SUBROUTINE STIF1

プレスボードの静的、動的の性質は第 6 章において詳述したとおりである。簡単にいつて非直線性であり、ヒステリシス損失があり、繰り返しの影響を受け、きわめて複雑怪奇な性質を持つ。したがってそのまゝを計算機で表現することは非常に困難であるので、つぎのごとく簡素化した。

1. ヒステリシス損失は振動の式の damping の項に含めて考えることとする (STIF1 では無関係)
2. 繰り返しの影響は初回上昇のみが異なり、一度下降を始めるとそれ以后は上昇下降とも同じ特性をたどる。
3. 歪対荷重特性は、始点が与えられると、傾斜のみが一定の関係式で与えられる。傾斜は、荷重が小さい間は歪に対して指数函数的に上昇するが、或値以後は直線関係となる。
4. プレスボードは圧縮方向にのみ力は伝達するが、引張り方向には伝達しない。すなわち逆流作用を持つ。
5.  $0.2 \text{ Kg/cm}^2$  以下の縮付力は存在しない。縮付力 0 の INPUT があつても、0.2 にセットされる。また繰り返し曲線に沿つて下降して来たときも 0.2 以下にはならず、さらにゆるめるとその値に留まる。(4 の補足)

数式で特性を表すと

FO : 縮付けられる前の初荷重 ( $\text{Kg/cm}^2$ )  
 DX0 : その時の歪量  
 F1 : 縮付荷重 ( $\text{Kg/cm}^2$ )  
 DX1 : そのときの歪量                      とする

# 1. 半対数目盛で傾斜一定の特性

## A. 処女曲線

$$F1 = F0 \text{ Exp } (71.5 (DX1 - DX0))$$

## B. 繰り返し曲線

$$F1 = F0 \text{ Exp } (128 (DX1 - DX0))$$

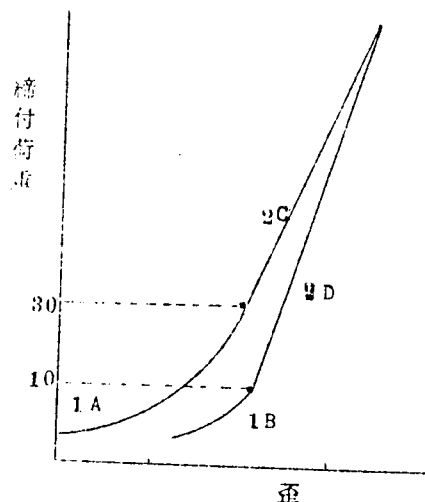
# 2. 直線目盛で傾斜一定の特性

## C. 処女曲線

$$F1 = F0 + 2060 \times (DX1 - DX0)$$

## D. 繰り返し曲線

$$F1 = F0 + 2120 \times (DX1 - DX0)$$



第7.1-2図 SFIF1 特性

## 7.1.4. SUBROUTINE DETRS, POLHM

変圧器設計寸法を計算機内で使用し易い寸法に変換するSUBROUTINEである。電磁力を計算するときには、コイル電流は厚さの無い板電流として計算するので、鉄心左隅角を直角座標の原点としてコイル厚さ中心線を計算しておく必要がある。絶縁組立図、巻線仕様書から与えられるのはコイル、絶縁物の個々の寸法であるので、算術を行なつて座標軸を決めるわけである。傾斜したコイルは電磁力は計算不能であるので、コイル巾中央位置においてY軸に平行であると仮定している。

コイル板数が少ない変圧器ではINPUT DATAのチェックにも誤りを犯すおそれは少ないが、50枚にもおよぶ大形変圧器では、見落しも生じかねないので、感覚に訴えられるようにコイル配置を図示することにした。コイル間絶縁物の厚さの最も狭い物を単位に取り、その巾を一行に取つて他の厚さは切捨て計算で倍数を求める。高圧は文字H、中圧はM、低圧はLで打出し、鉄心位置は・の線で入る。

SUBROUTINE POLHMは図を書くためのプログラムである。

## 7.2. 電磁力の計算

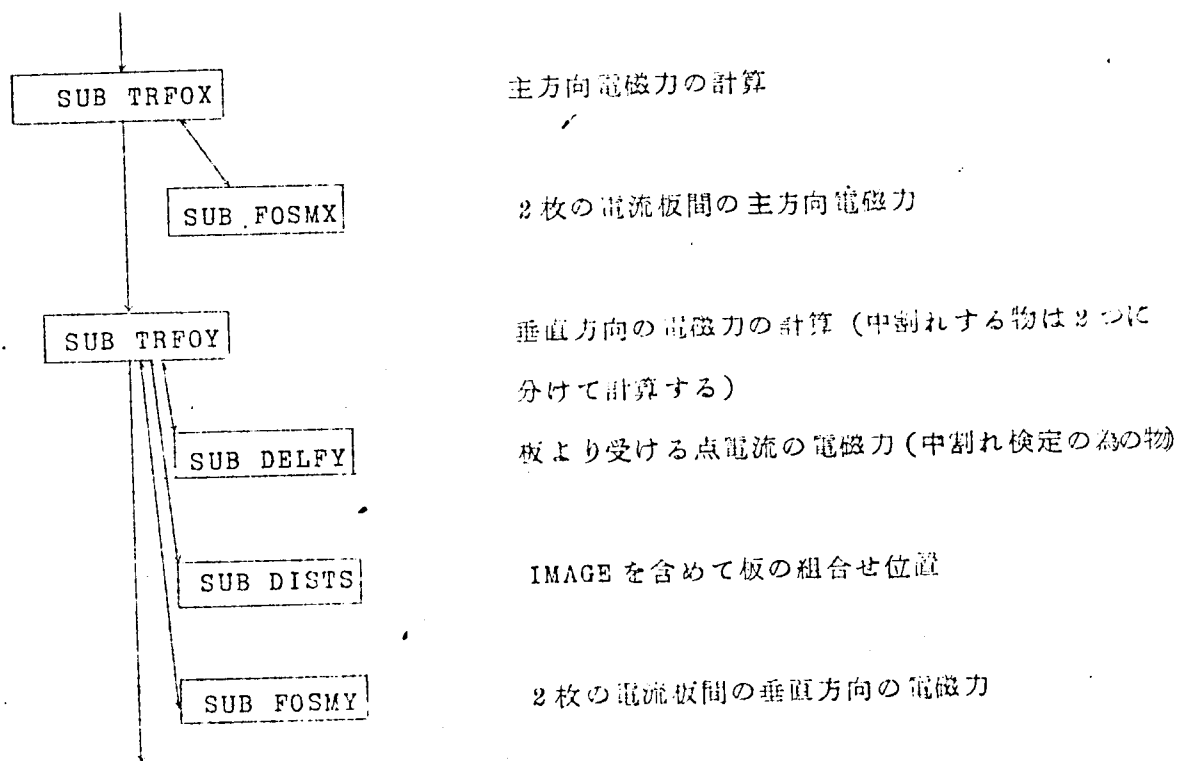
電磁力の計算を電子計算機で行なうのは、抵抗紙模擬でえられる結果を、小さい労力と少しの費用でえんとするものであつて、三次元を二次元で推定する誤差を避ける手段が講ぜられているわけでは無い。抵抗紙模擬法は、ベクトルポテンシャルに関して成立するポアッソンの式を直接解く方法である。電子計算機を用いて同じようにポアッソンの式を緩和法を用いて解か

せたが、7090をもつてしても未だメモリー、速度の点で不十分で、満足な結果はえられなかった。こゝで用いる理論は、Biot-Savart の法則を用い、板電流と板電流との間に働く電磁力を理論的に求め、計算機で計算させるものである。鉄心の影響は IMAGE を取つて等価に置いている。IMAGE の数は多次まで取れば取るほど正確になるが、計算時間と精度の兼ね合いから第一次の IMAGE までの計算を行なうにとどめている。

電磁力の計算は、主方向電磁力と垂直方向電磁力の両成分に分けて計算を行なう。1枚のコイルに働く力は積分してしまい、コイルは無限大の剛性を持つものと考えたのは締付けの時と同じ考えである。

垂直方向の電磁力は、コイル配置如何では鉄心内でコイルが中割れする可能性が考えられる。コイル巻線は圧縮方向には力を伝えるが、引張り方向には力は伝わらず、コイルが割れるので垂直方向電磁力を1枚のコイル内で積分する時は方向を考えて積分する必要があるので、先づ中割れの有無を検定し、中割れを生ずる物はその点を求めてコイルを2枚と考えて計算している。

全体の FLOW は次のようになっている。



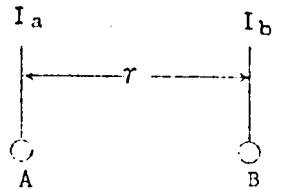
### 7.2.1. 理論式

2枚の電流板が平行して置かれたときに働く電磁力を求める計算式を立てる。

以下の理論式はすべてM, K, S 合理化単位を使用する。

# I 無限平行導体に働く力 (1M 当り)

第 7.2-1 に示すごとく、線間距離  $r$  なる 2 本の無限に長い平行導体 A, B が、紙面に垂直な方向にあり、その中を  $I_a, I_b$  なる電流が流れているとすると、 $I_a$  によつて作られる B 点における磁束密度  $B$  は、



第 7.2-1 図  
二線間に働く力

$$\oint H d\ell = I_a$$

$$H \cdot 2\pi r = I_a$$

$$H = \frac{I_a}{2\pi r} \dots\dots\dots (7.2-1)$$

$$B = \mu_0 H$$

$$\therefore B = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times I_a}{2\pi r} = \frac{2 I_a}{r} \times 10^{-7} \dots\dots\dots (7.2-2)$$

したがつて導体 B に働く電磁力は

$$F = I_b \cdot B = \frac{2 I_a \cdot I_b}{r} \times 10^{-7} \text{ [Newton/Meter]} \dots\dots\dots (7.2-3)$$

但し  $I_a, I_b$  in Ampere

$r$  in meter

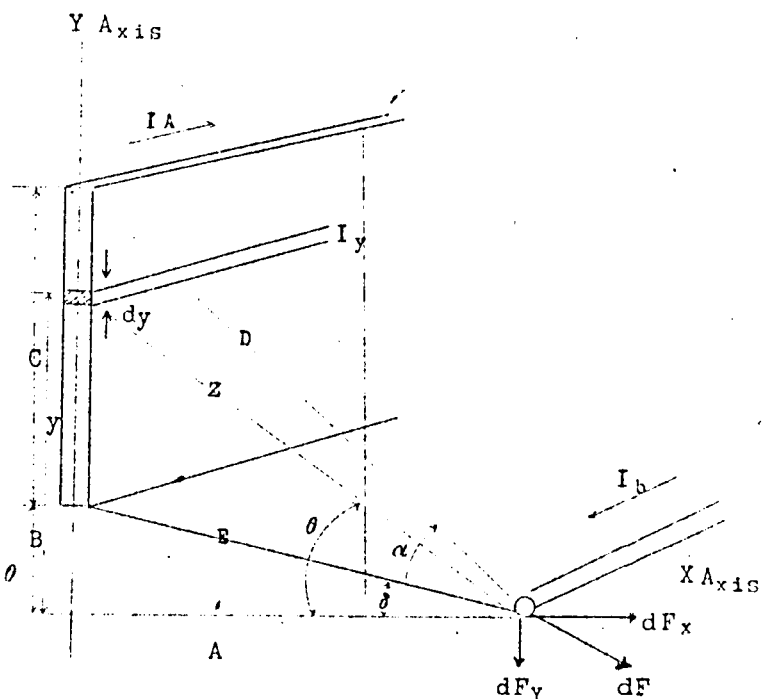
# II 板電流により、それと平行な線電流に働く力 [単位長当り]

右図のごとき物理的配置のもとで、巾  $C$  なる板に全電流  $I_A$  が流れたとき、この板と平行な線電流  $I_b$  に働く電磁力 (1M あたりの) を求める。板電流の細片  $dy$  に流れる電流と線電流との間の電磁力は (7.2-3) より

$$dF = \frac{2 \cdot (I_A/C) \cdot dy \cdot I_b}{Z} \times 10^{-7} \dots\dots\dots (7.2-4)$$

$$\therefore dF_x = 2 \cdot \left(\frac{I_A}{C}\right) \cdot \left(\frac{I_b}{Z}\right) \cdot dy \times 10^{-7} \cos \theta \dots\dots\dots (7.2-5)$$

$$dF_y = 2 \cdot \left(\frac{I_A}{C}\right) \cdot \left(\frac{I_b}{Z}\right) \cdot dy \times 10^{-7} \sin \theta \dots\dots\dots (7.2-6)$$



第 7.2-2 図 板電流と線電流

板電流全体から受ける力の内 X 成分は

$$F_x = \int_B^{B+C} dF_x = \int_0^{\alpha+\delta} dF_x = \int_0^{\alpha+\delta} 2 \cdot \left( \frac{I_A}{C} \right) \left( \frac{I_b}{Z} \right) \cdot dy \times 10^{-7} \cos \theta$$

$$\tan \theta = \frac{y}{A} \quad \therefore dy = \frac{A}{\cos^2 \theta} d\theta$$

$$Z = \frac{A}{\cos \theta}$$

であるから

$$\therefore F_x = \int_0^{\alpha+\delta} 2 \cdot \left( \frac{I_A}{C} \right) \cdot I_b \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{A}{\cos^2 \theta} d\theta \times 10^{-7} \cdot \cos \theta$$

$$= \int_0^{\alpha+\delta} 2 \cdot \left( \frac{I_A}{C} \right) \cdot I_b \cdot d\theta \times 10^{-7} = 2 \cdot \frac{I_A \cdot I_b}{C} \cdot \alpha \times 10^{-7}$$

$$F_x = 2 \cdot \frac{I_A \cdot I_b}{C} \cdot \alpha \times 10^{-7} \quad (\text{Newton/M}) \dots\dots\dots (7.2-7)$$

ただし  $I_A, I_b$             in Ampere  
            $C$                  in meter  
            $\alpha$                 in radian

板電流から受ける Y 成分

$$F_Y = \int_B^{C+B} dF_Y = \int_B^{C+B} 2 \cdot \left( \frac{I_A}{C} \right) \cdot \frac{I_b}{Z} dy \cdot \sin \theta \times 10^{-7}$$

$$Z^2 = y^2 + A^2 \quad \therefore dy = \frac{Z}{y} dZ$$

$$\sin \theta = \frac{y}{Z}$$

であるから

$$F_Y = \int_E^D 2 \cdot \left( \frac{I_A}{C} \right) \cdot \frac{I_b}{Z} \cdot \frac{Z}{y} dZ \cdot \frac{y}{Z} \cdot 10^{-7} = \int_E^D 2 \cdot \frac{I_A}{C} \cdot I_b \cdot \frac{1}{Z} dZ \cdot 10^{-7}$$

$$\therefore F_Y = 2 \cdot \frac{I_A I_b}{C} \ln \left( \frac{D}{E} \right) \cdot 10^{-7} \quad (\text{Newton/M}) \dots\dots\dots (7.2-8)$$

ただし  $I_A, I_b$             in Ampere  
            $C, D, E$           in meter  
            $\ln$                 natural Logarithm

### III 板電流間に働く電磁力〔単位長当たり〕

IIで求めた板電流・線電流の式を積分することにより、板一板間の電磁力を計算する。

X成分

Bなる板の細片に働く電磁力は(7.2-7)より

$$\begin{aligned}\Delta F_x &= 2 \cdot \frac{I_A \cdot I_B}{C_1} \cdot \alpha \cdot 10^{-7} \\ &= 2 \cdot \frac{I_A}{C_1} \cdot \left( \frac{I_B}{C_2} \right) \cdot dy_1 \cdot \alpha \cdot 10^{-7} \\ &= K \cdot dy_1 \cdot \alpha \quad [\text{Newton/Meter}] \\ \text{ただし } K &= \frac{2 I_A \cdot I_B}{C_1 C_2} \cdot 10^{-7}\end{aligned}$$

Bなる板全体に働く電磁力は

$$F_x = \int_0^{C_2} K \cdot dy_1 \cdot \alpha = K \int_0^{C_2} \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{y_1 - B}{A} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{C_1 + B - y_1}{A} \right) \right\} dy_1$$

$$= K \left( \int_0^{C_2} \tan^{-1} \frac{y_1 - B}{A} dy_1 + \int_0^{C_2} \tan^{-1} \frac{C_1 + B - y_1}{A} dy_1 \right) \dots \dots \dots (7.2-9)$$

$$t_1 = \frac{y_1 - B}{A} \qquad t_2 = \frac{C_1 + B - y_1}{A} \qquad \text{と お い て}$$

$$F_x = K \left( \int_{-\frac{B}{A}}^{\frac{C_2 - B}{A}} A \tan^{-1} t_1 dt_1 + K \int_{\frac{C_1 + B - C_2}{A}}^{\frac{C_1 + B}{A}} -A \tan^{-1} t_2 dt_2 \right)$$

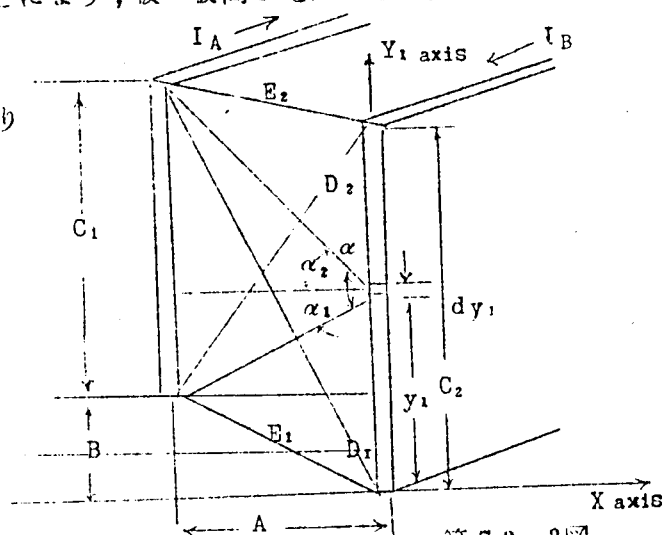
一般公式より

$$\int \tan^{-1} x dx = x \tan^{-1} x - \frac{1}{2} \ln(1+x^2)$$

$$\begin{aligned}\therefore F_x &= K \left[ (C_2 - B) \tan^{-1} \frac{C_2 - B}{A} - \frac{A}{2} \ln \left\{ 1 + \left( \frac{C_2 - B}{A} \right)^2 \right\} + B \tan^{-1} \left( -\frac{B}{A} \right) + \frac{A}{2} \times \right. \\ &\quad \ln \left\{ 1 + \left( \frac{B}{A} \right)^2 \right\} - (C_1 + B - C_2) \tan^{-1} \frac{C_1 + B - C_2}{A} + \frac{A}{2} \ln \left\{ 1 + \left( \frac{C_1 + B - C_2}{A} \right)^2 \right\} \\ &\quad \left. + (C_1 + B) \tan^{-1} \frac{C_1 + B}{A} - \frac{A}{2} \ln \left\{ 1 + \left( \frac{C_1 + B}{A} \right)^2 \right\} \right] \dots \dots \dots (7.2-10)\end{aligned}$$

Newton/Meter

$$\text{ただし } K = \frac{2 I_A \cdot I_B}{C_1 C_2} \cdot 10^{-7}$$



第 7.2-3 図  
板電流と  
板電流

Y 方向成分

B なる板の細片に働く電磁力は (7.2-8) より

$$\begin{aligned}
 \Delta F_Y &= 2 \cdot \frac{IA \cdot Ib}{C} \ln\left(\frac{D}{E}\right) \times 10^{-7} \\
 &= 2 \cdot \left(\frac{IA}{C_1}\right) \cdot \left(\frac{IB}{C_2}\right) \cdot dy_1 \ln\left\{ \frac{\sqrt{A^2 + (C_1 + B - y_1)^2}}{\sqrt{A^2 + (y_1 - B)^2}} \right\} 10^{-7} \\
 &= K \cdot \left\{ \ln \frac{\sqrt{A^2 + (C_1 + B - y_1)^2}}{\sqrt{A^2 + (y_1 - B)^2}} \right\} dy_1 \\
 \text{ただし } K &= 2 \frac{IAIB}{C_1 C_2} 10^{-7}
 \end{aligned}$$

B なる板の長さにわたり積分して全 Y 方向電磁力を求める。

$$\begin{aligned}
 F_Y &= K \int_0^{C_2} \ln \frac{\sqrt{A^2 + (C_1 + B - y_1)^2}}{\sqrt{A^2 + (y_1 - B)^2}} dy_1 \\
 &= \frac{K}{2} \int_0^{C_2} \ln (A^2 + (C_1 + B - y_1)^2) dy_1 - \frac{K}{2} \int_0^{C_2} \ln (A^2 + (y_1 - B)^2) dy_1 \dots\dots\dots (7.2-11)
 \end{aligned}$$

(7.2-11) 式第一項に関し

$$\begin{aligned}
 C_1 + B - y_1 &= t \quad \text{とおき} \quad dy_1 = -dt \\
 y_1 = 0 & \quad t = C_1 + B \\
 y_1 = C_2 & \quad t = C_1 + B - C_2 \\
 F_{Y1} &= \frac{1}{2} K \int_{C_1 + B - C_2}^{C_1 + B} \ln (A^2 + t^2) dt \\
 &= \frac{1}{2} K \left[ t \ln (t^2 + A^2) - 2t + 2A^2 \left( \frac{dt}{t^2 + A^2} \right) \right]_{C_1 + B - C_2}^{C_1 + B} \\
 &= \frac{1}{2} K \left[ t \ln (t^2 + A^2) - 2t + 2A \tan^{-1} \frac{t}{A} \right]_{C_1 + B - C_2}^{C_1 + B} \\
 &= K \left[ (C_1 + B) \ln D_1 - (C_1 + B - C_2) \ln E_2 + A \tan^{-1} \frac{C_1 + B}{A} - A \tan^{-1} \frac{C_1 + B - C_2}{A} - C_2 \right] \\
 &\dots\dots\dots (7.2-12)
 \end{aligned}$$

(7.2-11) 式第二項に関し

$$\begin{aligned}
 y_1 - B &= t & \therefore dy_1 &= dt \\
 y_1 = 0 & \quad t = -B \\
 y_1 = C & \quad t = C_2 - B
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{Y2} &= -\frac{K}{2} \int_0^{C_2} \ln \{ A^2 + (y_1 - B)^2 \} dy_1 \\
 &= -\frac{K}{2} \int_{-B}^{C_2 - B} \ln (A^2 + t^2) dt \\
 &= -\frac{K}{2} \left[ t \ln (A^2 + t^2) - 2t + 2A \tan^{-1} \frac{t}{A} \right]_{-B}^{C_2 - B} \\
 &= -K \left\{ (C_2 - B) \ln D_2 - C_2 + A \tan^{-1} \frac{C_2 - B}{A} + B \ln E_1 + A \tan^{-1} \frac{B}{A} \right\}
 \end{aligned}$$

.....(7.2-13)

$$\therefore F_Y = F_{Y1} + F_{Y2}$$

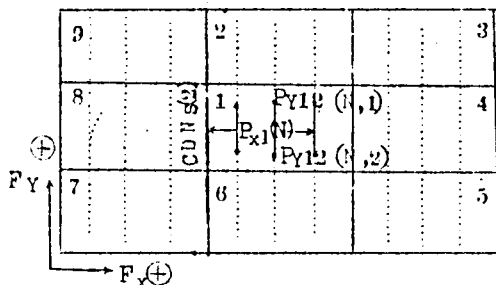
$$\begin{aligned}
 &= K \left\{ (C_1 + B) \ln D_1 - (C_2 - B) \ln D_2 - B \ln E_1 - (C_1 + B - C_2) \ln E_2 \right. \\
 &\quad \left. + A \left\{ \tan^{-1} \frac{C_1 + B}{A} - \tan^{-1} \frac{C_1 + B - C_2}{A} - \tan^{-1} \frac{C_2 - B}{A} - \tan^{-1} \frac{B}{A} \right\} \right\}
 \end{aligned}$$

.....(7.2-14)

$$\text{ただし } K = \frac{2 \cdot I_A \cdot I_B}{C_1 C_2} \cdot 10^{-7}$$

### 7.2.2. SUBROUTINE TRFOX, FOSMX

X 方向 (主方向) 電磁力を計算するためのプログラムである。理論式は (7.2-10) 式であつて FOSMX にまとめられている。鉄心の影響は IMAGE を取つて等価性を与えているが、計算は鉄心内のみならずコイルエンド部にも利用できるように、計算するブロックは NONT によつて制御する。ブロック番号は第 7.2-4 図に示すように名付け、計算したいブロックにはその番号を書き、計算する必要の無いブロックには 0 を入れることにしている。

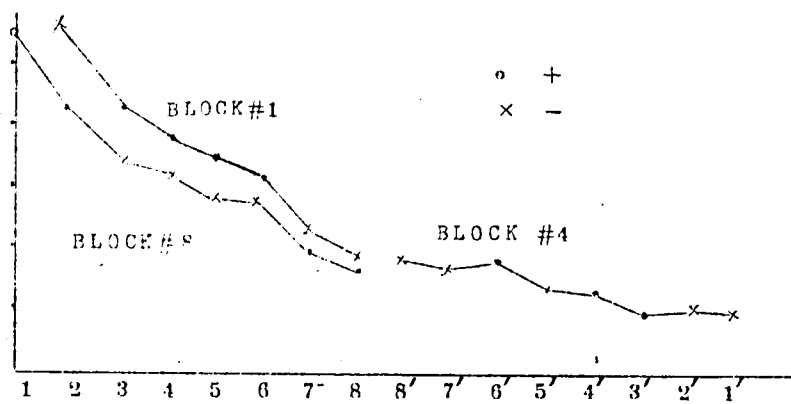


第 7.2-4 図 IMAGE 番号の取り方

IMAGE を何回迄取るかは計算時間、ひいては経費によつて決定されるもので、技術的な問題では無い。第 7.2-5 図は本プログラムを用いて IMAGE の影響を計算した結果である。



このグラフは#1コイルに働く他のコイルからの電磁力で、距離が遠くなるほどおおよす力は低下する。0次の像によつて#1におおよす力を100とすると、左側No 8ブロック全体の力は43.8であり、第2次のIMAGEに相当する距離離れたNo 4ブロックの影響は3.1である。したがつ



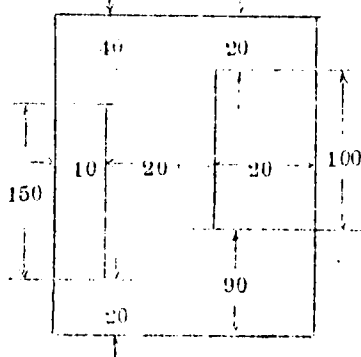
第7.2-5図 イメージの影響

て、モデルトランスのようなコイル配置では、一次のIMAGEまでとれば98%程度の精度を持つものと考えてよい。

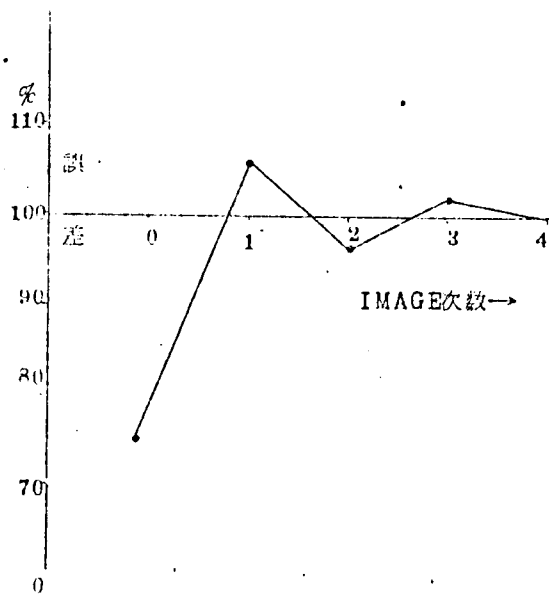
後日IMAGEの影響をさらに高次まで計算させた結果をえた。2枚の電流板を下図のように配置し、第四次像まで計算させた結果では、第四次像まで計算した結果を100%として下記のようになる。

0次のみ	-24.05%
1次まで計算	+ 5.16%
2次まで計算	- 4.19%
3次まで計算	+ 2.26%
4次まで計算	100%

IMAGEの次数を増して行くと振動しながら真の値に近づいて行くが、収束の具合は非常に遅いように感ぜられる。鉄心の影響は、コイルと鉄心・相対関係によつて変わるので一概にはいえないが、普通の構造での変圧器では一次のIMAGEまで取れば5%以下の誤差で推定できることが、この例からも確認できた。



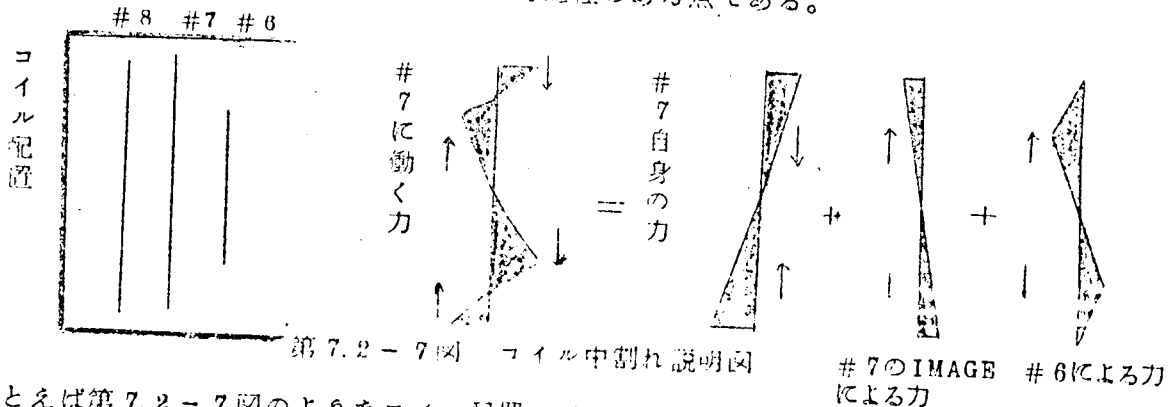
電流板配置



第7.2-6図 IMAGE 次数と誤差

## 7.2.3. SUBROUTINE TRFOY

垂直方向電磁力を求めるプログラムである。用いる理論式は(7.2-14)式で、FOSMYのSUBROUTINEとなつている。IMAGEに対する考え方は主方向電磁力の計算の場合とまったく同じであつて、NONTでブロックを制御する。主方向電磁力との大きな違いは、垂直方向電磁力はコイル巾中央付近で中割れを生じる可能性のある点である。



第7.2-7図 コイル中割れ説明図

たとえば第7.2-7図のようなコイル配置では、#7に働く電磁力は、自分自身によつてコイル巾が縮む方向の力と、鉄心のために生じるIMAGEによつてコイル中央で分離せんとする力と、#6の電流によつてやはり中割れしようとする力の合成からなり、低圧コイルのごとく鉄心までの距離が狭く、IMAGEによる影響力が大きくて、さらに隣のコイルの電流方向が反対で短い時には中割れする。本プログラムでは中割れすると思はれるコイルは、人間が判断しNJJで制御する。中割れすると予想されたコイルは、コイル巾中央からある距離離れた上下2点の磁束レベルをSUB.DELFYによつて計算し、内挿的に磁束0の場所を探し出し、その点で上下に別れる2枚のコイルに考え直し、各コイルの場所をIMAGEをも含めてSUB.DISTSで計算し、電流板間の力計算を行なり。SUB.FOSMYを呼出して電磁力計算を行なつている。

## 7.2.4. SUB DELFY

中割れすると予想されたコイルの中央よりある距離離れた2点に作用する電磁力を計算するプログラム。理論式は(7.2-15)により与えられる。

IMAGEは左右の一次IMAGEのみ考えることとした。

$$F_y = 2 \cdot \frac{I_A \cdot I_B}{C} \ln \left( \frac{D}{E} \right) \cdot 10^{-7} \text{ [Newton/M]} \dots \dots \dots (7.2-15)$$

## 7.2.5. SUB DISTS

IMAGEを含め、計算に入用なコイル位置を求めるプログラムである。

## 7.2.6. SUB FOSMY

2枚の板電流が与えられたときに働く垂直方向電磁力の計算プログラムである。

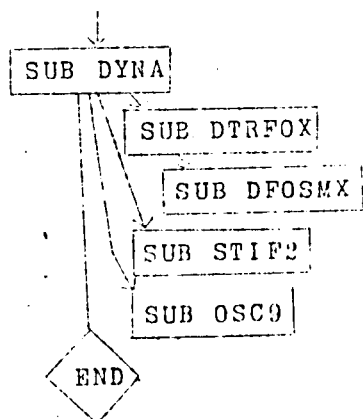
## 7.3. コイルの運動解析

変圧器の短絡強度を決定する要因として、短絡電流によつて誘起される電磁力の大小、および変圧器構成材の機械的強度が考えられていた。しかし、短絡時高速変カメラでコイルの運動を撮影して見ると、非常に複雑な動きが現れ、静的に考えただけでは不十分なことがうかがえる。特にプレスボードの圧縮荷重一歪の関係が非直線であるために、コイルの運動その物が非直線性を帯び、初期縮付力の大小、プレスボードの性質によつて、コイルの運動が非常に異つた動きをするものと推定される。また一般に、変圧器の機械的共振周波数は電源周波数と大きく離れていると考えられていたが、実際はあまり離れているものではなく、共振が起る可能性も縮付力如何によつては発生する。とくに電磁力の周波数成分は、短絡瞬時のDC分を含んでいる領域では60～(50～)の成分が大きく、時間の経過とともに電源周波数の2倍に移つて行くものであるから、共振の可能性は大きい。

短絡強度試験は非常に有効な手段であるが、あらゆる可能性を考えたモデルを作つて研究することは、費用の点から云つても不可能であるので、電子計算機を一種のシミュレーターと考へて諸常数を変えたときの変圧器のコイルの運動を推定せんとするものである。

実際の短絡試験時のコイルの運動は三次元的である。すなわち主方向電磁力、垂直方向電磁力、コイルの巻き方向、の3方向があるが主方向電磁力によるものを検討することにする。

解法としてはコイル1枚を一質点と考へ、プレスボードの特性によつて決定されるスプリング常数と、実測値から推定される減衰係数よりなる連立二次微分方程式をEuler法で解き、Stepが進むごとに電磁力、スプリング常数を修正して行く方法である。



コイルの主方向に対する運動方程式の解法

コイルの移動に伴う電磁力の変化分

2枚のコイルが移動したときの電磁力の減衰係数

プレスボードの特性 撓み→荷重

Outputをグラフに画かせる

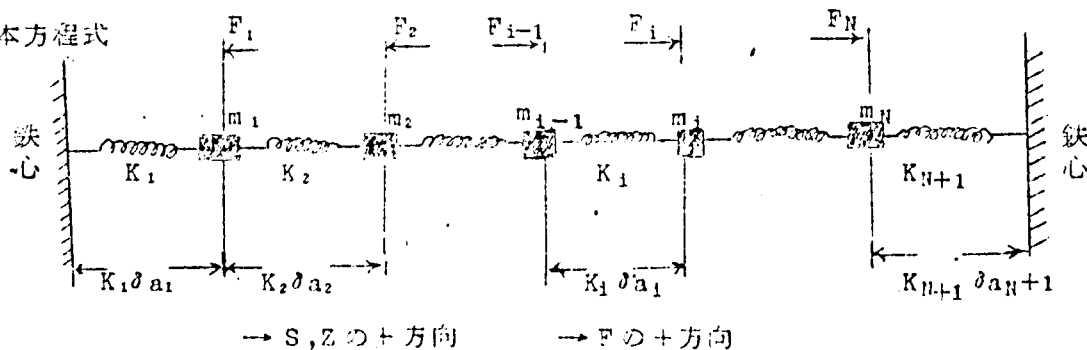
### 7.3.1. 多次元振動系の運動方程式

変圧器巻線に電流が流れ電磁力が発生すると、巻線は運動する。巻線 1 枚を一質点と考え、絶縁物であるプレスボードの弾性をスプリングと看做し、プレスボードの持つヒステリシス損、摩擦損失、衝撃による損失などもすべてひつくるめて粘性損失と考えて、微分方程式を立てると、連立二次多元の微分方程式となる。外鉄形変圧器の構造から云って、コイル間およびコイル鉄心間の弾性体はまったく同じ材料を使用しているため、同じ弾性率（非直線）を使用する。第 7.3-1 図はコイル群の等価回路である。

記号として下記の物を使用する。

- $A$  : プレスボードの断面積
- $a$  : 圧縮される前の絶縁物厚さ
- $E$  : ヤング率
- $F_c$  : 組立時の圧縮力
- $F(t)$  : 駆動力
- $F_0$  : 駆動力の振巾項
- $f(t)$  : 駆動力の時間的变化項
- $i(t)$  : 短絡電流
- $K$  : 弾性係数
- $m$  : コイル質量
- $N$  : コイル数
- $P$  : 摩擦係数
- $S$  : 偏位量
- $Z$  : 相対偏位量
- $\delta a$  : 絶縁物の圧縮量
- $\delta a(0)$  :  $t=0$ （短絡前）の絶縁物圧縮量
- $\tau$  : 時間ステップ

#### 1. 基本方程式



第 7.3-1 図 等価回路

各質点に関して動的釣合いの条件が成立する。

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{S}_1 + m_1 P \dot{S}_1 + K_2 \delta a_2 - K_1 \delta a_1 &= F_{10} f(t) \\ m_2 \ddot{S}_2 + m_2 P \dot{S}_2 + K_3 \delta a_3 - K_2 \delta a_2 &= F_{20} f(t) \\ \vdots \\ m_i \ddot{S}_i + m_i P \dot{S}_i + K_{i+1} \delta a_{i+1} - K_i \delta a_i &= F_{i0} f(t) \\ \vdots \\ m_N \ddot{S}_N + m_N P \dot{S}_N + K_{N+1} \delta a_{N+1} - K_N \delta a_N &= F_{N0} f(t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7.3-1)$$

$S_i$  は偏位の絶対量であるがこれを相対偏位  $Z_i$  に変換すると

$$Z_i(t) = S_i(t) - S_i(0)$$

$$\dot{Z}_i(t) = \dot{S}_i(t)$$

$$\ddot{Z}_i(t) = \ddot{S}_i(t)$$

ゆえに (7.3-1) 式は

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{Z}_1 + m_1 P \dot{Z}_1 + K_2 \delta a_2 - K_1 \delta a_1 &= F_{10} f(t) \\ m_2 \ddot{Z}_2 + m_2 P \dot{Z}_2 + K_3 \delta a_3 - K_2 \delta a_2 &= F_{20} f(t) \\ \vdots \\ m_i \ddot{Z}_i + m_i P \dot{Z}_i + K_{i+1} \delta a_{i+1} - K_i \delta a_i &= F_{i0} f(t) \\ \vdots \\ m_N \ddot{Z}_N + m_N P \dot{Z}_N + K_{N+1} \delta a_{N+1} - K_N \delta a_N &= F_{N0} f(t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7.3-2)$$

## 2. 摩擦係数

粘性ダンピングのある自由振動は一般に次式で与えられる。

$$m\ddot{x} + mpx + Kx = 0$$

減衰振動条件における解は

$$X = Ce^{-mpt/2m} \sin(\omega_0 t + \theta)$$

$$= Ce^{-t/\tau} \sin(\omega_0 t + \theta) \dots\dots\dots (7.3-3)$$

したがって減衰直を包んだ包絡線は指数函数的に減衰し、時定数は

$$T = 2/P$$

である

# 7 Coil の主方向偏位のオシロより短絡電流遮断後の減衰時定数を求めると、だいたい

5msec 程度と考えられる。故に  $P = 100$  とすればよい。

### 3. 短絡電磁力

右図のごとき回路の短絡電流は

$$i = \sqrt{2} I \{ \sin(\omega t + \phi - \varphi) - \sin(\phi - \varphi) e^{-\alpha t} \} \dots (7.3-4)$$

$$\text{ただし } \sqrt{2} \cdot I_{\text{eff}} = \frac{\sqrt{2} V_{\text{eff}}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \omega L / R$$

$\phi$ : 投入位相

一般に  $\varphi = \frac{\pi}{2}$  であつて最大電流は  $\phi = 0$  で与えられる。

しかるときは

$$i = \sqrt{2} \cdot I_{\text{eff}} (e^{-\alpha t} \cdot \cos \phi - \cos(\omega t + \phi)) \dots (7.3-5)$$

電磁力は電流の自乗に比例するから

$$F = \frac{1}{2} A + A e^{-2\alpha t} - 2 A e^{-\alpha t} \cos \omega t + \frac{1}{2} A \cos 2\omega t$$

$$= A \left( \frac{1}{2} + e^{-2\alpha t} - 2 e^{-\alpha t} \cos \omega t + \frac{1}{2} \cos 2\omega t \right)$$

$$= b I_{\text{eff}}^2 (1 + 2 e^{-2\alpha t} - 4 e^{-\alpha t} \cos \omega t + \cos 2\omega t)$$

ただし

$b$ : 電流 1 A 流れたときに働く電磁力

$\alpha$ :  $R/L$

計算機で計算するときには展開しない方が計算時間は短い。ゆえに、

$$F_i = F_{i0} f(t) = 2 I_{\text{eff}}^2 \cdot b \cdot (e^{-\alpha t} \cdot \cos \phi - \cos(\omega t + \phi))^2 \dots (7.3-6)$$

### 4. 階差方程式

微分を階差方程式で表現すると次式のごとく 3 つの現し方がある。

$$Z'(t) \begin{cases} \frac{Z(t) - Z(t - \tau)}{\tau} \\ \frac{Z(t + \tau) - Z(t)}{\tau} \dots (7.3-7) \\ \frac{Z(t + \tau) - Z(t - \tau)}{2\tau} \end{cases}$$

$$Z''(t) \begin{cases} \frac{Z(t) - 2Z(t - \tau) + Z(t - 2\tau)}{\tau^2} \\ \frac{Z(t) - 2Z(t + \tau) + Z(t + 2\tau)}{\tau^2} \dots (7.3-8) \\ \frac{Z(t + \tau) - 2Z(t) + Z(t - \tau)}{\tau^2} \end{cases}$$

計算の便誼上一次に対しては前方微分，二次に対しては後方微分を用いる。

$$\dot{Z} \approx \frac{Z(t) - Z(t - \tau)}{\tau} \quad \dots\dots\dots (7.3-9)$$

$$\ddot{Z} \approx \frac{Z(t + \tau) - 2Z(t) + Z(t - \tau)}{\tau^2}$$

(7.3-2) 式の一般形は (7.3-10) 式で与えられる。

$$m_i \ddot{Z}_i + m_i P \dot{Z}_i + K_{i+1} \delta a_{i+1} - K_i \delta a_i = F_{i0} f(t)$$

$$\frac{m_i}{\tau^2} [Z_i(t + \tau) - 2Z_i(t) + Z_i(t - \tau)] + \frac{m_i}{\tau} P [Z_i(t) - Z_i(t - \tau)] + K_{i+1} \delta a_{i+1}$$

$$- K_i \delta a_i = F_{i0} f(t)$$

$$Z_i(t + \tau) = Z_i(t) (2 - P\tau) - Z_i(t - \tau) (1 - P\tau) + \frac{\tau^2}{m_i} (K_i \delta a_i - K_{i+1} \delta a_{i+1})$$

$$+ \frac{\tau^2}{m_i} F_{i0} f(t) \quad \dots\dots\dots (7.3-10)$$

### 7.3.2. SUB DYNA

コイル1枚を一質点と考慮して立てた連立微分方程式を，(7.3-10) 式の階差方程式として解くプログラムで，SUB, STIF2, DTR0FOX, OSC9 を含む。

### 7.3.3. コイルの移動に伴う電磁力の変化分

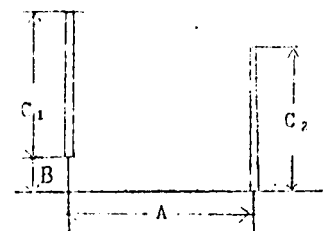
7.2 節で誘導したごとく板電流間に働く電磁力の計算は，相当複雑なものとなる。したがって短絡試験時にコイルに働く電磁力の推定を行なう場合のように，コイルの移動を考えてその都度電磁力を計算すれば計算時間が膨大なものになるので，なんらかの便法を考えねばならない。そこで変圧器コイルは短絡時に移動するといつてもその量は極めてわずかであるので，短絡瞬時の電磁力を一度計算して置き，以後は一次近次で近似せんとするものである。

2枚の板電流の相対位置は，第7.3-3図で与えられる。A, B,

C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> はいままでの定数と変りない。しかるとなれば

$$dF_x = \frac{\partial F_x}{\partial A} \delta A + \frac{\partial F_x}{\partial B} \delta B$$

$$dF_y = \frac{\partial F_y}{\partial A} \delta A + \frac{\partial F_y}{\partial B} \delta B$$



第7.3-3図 板電流配置図

$$\therefore F_x(A+\Delta A, B+\Delta B) \doteq F(A, B) + \frac{\partial F}{\partial A} \Delta A + \frac{\partial F}{\partial B} \Delta B$$

$$F_y(A+\Delta A, B+\Delta B) \doteq F(A, B) + \frac{\partial F_y}{\partial A} \Delta A + \frac{\partial F_y}{\partial B} \Delta B$$

7.2節で求められた(7.2-10), (7.2-14)式の $F_x, F_y$ を微分し $\partial F_x/\partial A$ ,

$\partial F_y/\partial A, \partial F_x/\partial B, \partial F_y/\partial B$ を求めると

$$\frac{1}{K} \frac{\partial F_x}{\partial A} = \mu_n \sqrt{\frac{(A^2+B^2)(A^2+\beta^2)}{(A^2+\alpha^2)(A^2+r^2)}} \dots\dots\dots (7.3-11)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{K} \frac{\partial F_y}{\partial A} = & 2A \left( \frac{r}{A^2+r^2} - \frac{\alpha}{A^2+\alpha^2} - \frac{\beta}{A^2+\beta^2} - \frac{B}{A^2+B^2} \right) \\ & - \left( \tan^{-1} \frac{r}{A} - \tan^{-1} \frac{\beta}{A} - \tan^{-1} \frac{\alpha}{A} - \tan^{-1} \frac{B}{A} \right) \dots\dots\dots (7.3-12) \end{aligned}$$

$$\frac{1}{K} \frac{\partial F_x}{\partial B} = \left\{ \tan^{-1} \frac{(C_2-B)}{A} + \tan^{-1} \frac{B}{A} + \tan^{-1} \frac{(C_1+B-C_2)}{A} - \tan^{-1} \frac{C_1+B}{A} \right\} \dots\dots (7.3-13)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{K} \frac{\partial F_y}{\partial B} = & \frac{1}{2} \mu_n \frac{\left\{ (C_1+B)^2 + A^2 \right\} \left\{ (C_2-B)^2 + A^2 \right\}}{\left\{ (C_1+B-C_2)^2 + A^2 \right\} \left\{ B^2 + A^2 \right\}} \\ & + \frac{(C_1+B)^2 - A^2}{(C_1+B)^2 + A^2} + \frac{(C_2-B)^2 - A^2}{(C_2-B)^2 + A^2} - \frac{(C_1+B-C_2)^2 - A^2}{(C_1+B-C_2)^2 + A^2} - \frac{B^2 - A^2}{B^2 + A^2} \dots\dots\dots (7.3-14) \end{aligned}$$

$$\text{ただし } K = \frac{2IAIB}{C_1 C_2} 10^{-7}$$

$$\alpha = C_2 - B$$

$$\beta = C_1 + B - C_2$$

$$r = C_1 + B$$

実用上の変圧器においては $A, B, C_1, C_2$ の間にはある制限条件があり、磁気中心が極端にずれるような設計はありえない。この条件を考へに入れて実際に数値計算してみると

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F_x}{\partial B} &\ll \frac{\partial F_x}{\partial A} \\ \frac{\partial F_y}{\partial A} &\ll \frac{\partial F_y}{\partial B} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7.3-15)$$

の条件が成立する。したがって2枚の電流線の相対距離が左右に $\Delta A$ 、上下に $\Delta B$ 動いたときの電磁力の変化分は、次式で計算できる。



$$\left. \begin{aligned} F_x (A+\Delta A, B+\Delta B) &\approx F (A, B) + \frac{\partial F_x}{\partial A} \cdot \Delta A \\ F_y (A+\Delta A, B+\Delta B) &\approx F (A, B) + \frac{\partial F_y}{\partial B} \cdot \Delta B \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7.3-16)$$

#### 7.3.4. SUB DTRFOX

前項で求めたコイルが微少量動いた場合の主方向電磁力の変化分を求めるプログラムである。

#### 7.3.5. SUB DFOSMX

2枚の電流板が基準位置よりそれぞれ移動したときの電磁力の微係数を求めるプログラムである。

#### 7.3.6. SUB STIF2

プレスボードの撓み量を与えて荷重を求める PROGRAM であり，基本的な考えは STIF1 と同様である。ただ STIF1 は初期縮付けであるために縮付け前の荷重は 0，撓みも 0 であつて，処女曲線に沿つて上昇するだけであるが，STIF2 はコイルの運動に伴うコイル間相対位置の変化で縮付圧力がどのように変つて行くかを求めるときに利用するプログラムであるから，STIF1 には持たない判定を入れてある。特性の概略を書くと

- (1) 特性曲線は処女曲線と繰り返し曲線とからなる。
- (2) 始めて上昇するときにはかならず処女曲線を上昇し，下降をするのは繰り返し曲線に従つて下る。下降曲線は降下点を通り，傾斜が一定な曲線である。
- (3) さらに上昇に転ずるとこのときには，繰り返し曲線に従つて上昇を続け，処女曲線と交る点を過ぎてさらに上昇するときには，処女曲線に沿つて上昇する。処女曲線と交る所までの範囲内で上下するときには，繰り返し曲線の上であつて，処女曲線と交り処女曲線に沿つて上昇した後に下降を再び行なうときは，(2) と同様である。
- (4) 曲線の特性は始点が与えられと傾斜一定の性質を持ち，

処女曲線

$$0.2 \sim 30 \text{ kg/cm}^2 \quad D \times I = D \times 0 + \frac{1}{71.5} \ln F1/F0$$

$$30 \text{ kg/cm}^2 \sim \quad D \times I = D \times 0 + (F1-F0)/2060$$

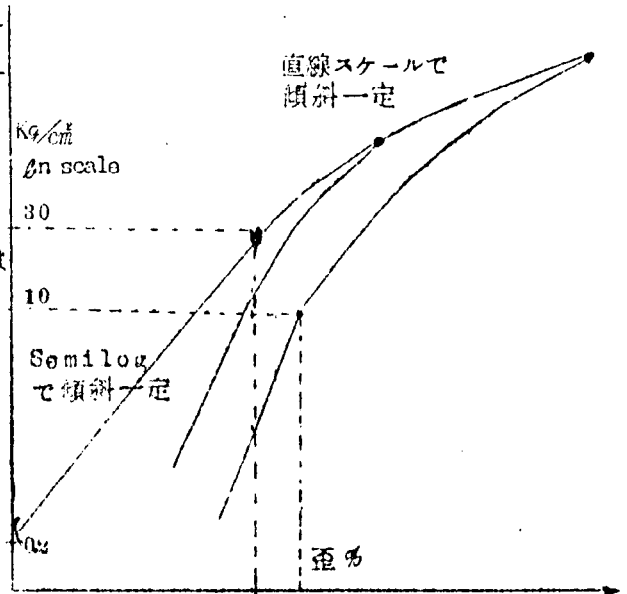
繰返し曲線

$$0.2 \sim 10 \text{ kg/cm}^2 \quad D \times I = D \times 0 + \frac{1}{128} \ln F1/F0$$

$$10 \text{ kg/cm}^2 \sim \quad D \times I = D \times 0 + (F1-F0)/2120$$

(5) 2つの線にまたがるような歪が与えられたときにも、かならず2本の線に沿って上下するようにプログラムされている。

(6)  $0.2 \text{ Kg/cm}$ 以下の荷重は無いと考えているが、繰り返し曲線に沿って降りて来たときは一回だけ  $0.2 \text{ Kg/cm}$ を越す事ができる。さらに歪が減少しても荷重、歪は変化しない。



### 7.3.7 SUB OSC9

計算機の OUTPUT をオシロのような形式で打出すものである。時間経過に従って変化

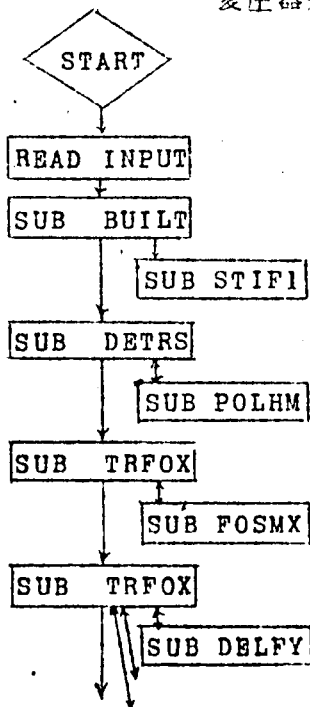
第 7.3.-4 図 プレスボードの特性

する多要素の現象を直観的に把握するためには波形にしてしまつた方が判り易いので作成した。要素数は最大 9 まで可能である。

### 7.4. 計算結果

以上に述べた SUBROUTINE を組合せ 1 ケのプログラムとした。下図はその説明図である。このプログラムを用い電磁力およびコイルの運動を種々の変圧器、組立条件について計算した。

#### 変圧器短絡強度に関する計算全フロー



設計データー、試験回路、コントロールの説込み。

図面寸法より縮付後の寸法を求める。

プレスボードの荷重→撓みを求める。

設計寸法より計算機に入用な寸法を計算。

コイル配置を図示する。

主方向電磁力の計算。

2枚の板電流間の主方向電磁力。

垂直方向の電磁力の計算。

板より受ける点電流の電磁力。

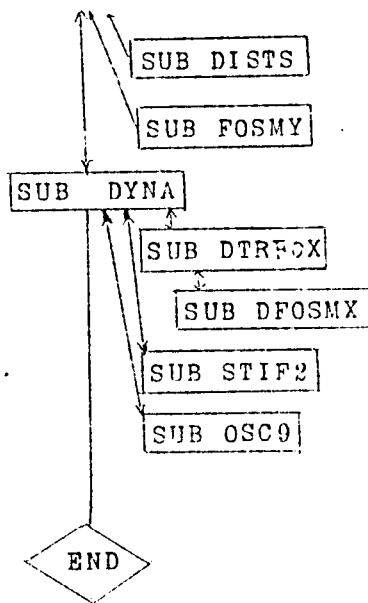


IMAGE を含めて板の組合せ位置。  
 2枚の板電流間の垂直方向の電磁力。  
 コイルの主方向に関する運動方程式。  
 コイルの移動による電磁力の変化。  
 2枚のコイルが移動した時の電磁力係数。  
 プレスボードの撓み→荷重を求める。  
 データを曲線で画かせる。

#### 7.4.1. 電磁力計算結果

1000KVAモデル変圧器に対しては下記の諸条件を計算した。

第7.4-1表 計算条件

項番	コイル位置	タップ	備考
A	コイルエンド上部 左辺	FULL	タンクは飽和
B	コイルエンド上部 右辺	〃	〃
C	鉄心内	〃	〃
D	コイルエンド底辺	〃	〃
E	コイルエンド上部左辺	MIN	〃
F	鉄心内	MIN	〃
G	コイルエンド底辺	FULL	タンク未飽和
H	コイルエンド底辺	FULL	タンク未飽和, コイル短絡時の最大振巾位置

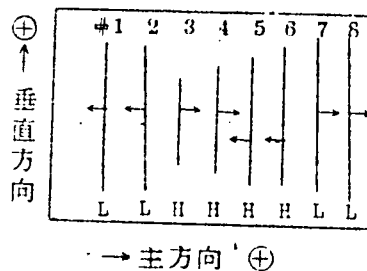
タンク飽和とあるのは、先の抵抗値による推定結果より、漏洩磁束は短絡電流が流れているときは20K ガウスにも達し、タンク壁が完全に飽和すると考える方が妥当と思われたので、タンク壁による IMAGE は計算しなかつた場合である。タンクを未飽和としたのはその影響を見るためと、Hにおいてはすでに計算済の結果との関係で未飽和と仮にしたものである。

計算結果を第7.4-2表に示す。短絡電流は電源イムピーダンスは0とし、交流分の波高値が流れた場合、すなわち一次電流値が

FULL TAP では 5226.2A

MIN TAP では 5762.2A

の場合が計算されている。電磁力の方向は右図のように定義する。



これらの結果を検討するとつぎのことが判る。

### 1. 鉄心に働く電磁力

第 7.4-1 図 電磁力の符号

この変圧器では、主方向電磁力は右図矢印のごとく、低圧 4 枚は外側に、又高圧 4 枚は相寄る方向に働く。したがって鉄心の受ける電磁力は静的に考えると、低圧コイルに働く電磁力と高圧コイル群内で打消し合わなかつた残りとの和である。高圧群内の残り分は、計算結果によると、鉄心内では右向きに 0.4TON/M、コイルエンド部では左辺が最も大きく左向きに 4.7 TON である。

コイル # 1 側とコイル # 8 側の鉄心に働く電磁力の値は完全に一致している。抵抗紙模擬では一致せず 10 % 程度の差があつた。

鉄心に働く電磁力が最も大きいケースは鉄心内 MINTAP である。鉄心内はコイルエンド部と異なり、4 周が鉄心にとり囲まれているので IMAGE の影響が最も大きく、MIN TAP では電流が MAX TAP の 10 % 増しであるから、電流による電磁力の増加は 20 % となるが、漏洩イムピーダンスが 10 % 低くなるので、結局 MAX TAP の 10 % 増の大きさとなる。

### 2. タンクの飽和の影響 (D.G)

コイルエンド部の計算を行なうとき、タンク壁は漏洩磁束レベルが高いので飽和するとしたが、その効果を調べる。

第 7.4-3 表 タンク飽和の影響 (%)

	1	2	3	4	5	6	7	8
主 方 向	5.5 %	1.2	1	3	-3.7	-1	-1	-5
垂 直 方 向	27 %	16.5	25	14	13	17.5	19.5	29

飽和の値で未飽和を割つた値の 1 からの増減 (%) は上の表のようになり、主方向では両端の低圧が最も大きな影響を受け 5 % である。垂直方向は両側にタンクが未飽和のままに存在すると磁束が引張られて回り、垂直成分は増大する。

### 3. コイルの中割れ現象(C)

抵抗紙模擬のところでも述べたごとく、鉄心内では短いコイルの傍に有る長いコイルは中割れを起す可能性がある。ただし、FULL TAP のときのように垂直方向磁気中心が一致している場合に限る。今回の計算でも FULLTAP のとき、# 2、# 7 コイルがほぼコイル中央に

第 7.4 - 2 表 電磁力計算結果 (TON), (FULL 5226.2A MIN 5762.2A )

項	条 件	Coil No.								
			1	2	3	4	5	6	7	8
主 方 向 電 力  Kg/M	A	コイルエンド上FULL 左 タンク飽和	-3.792	-16.62	17.376	6.241	-6.457	-21.885	18.673	6.464
	B	コイルエンド上FULL 右	-5.136	-16.411	17.717	6.893	-5.376	-20.944	18.104	5.154
	C	鉄 心 内FULL	-6.703	-20.393	20.199	8.639	-5.778	-22.621	20.230	6.416
	D	コイルエンド底FULL タンク飽和	-4.697	-16.076	17.249	6.897	-5.276	-20.265	16.900	5.269
	E	コイルエンド上MIN 左	-4.081	-17.413	19.479	5.630	-5.476	-23.873	19.026	6.707
	F	鉄 心 内MIN	-6.861	-20.918	22.187	7.510	-1.989	-24.297	20.769	6.605
	G	コイルエンド底FULL タンク未飽和	-4.955	-16.301	17.429	7.095	-5.078	-20.046	16.729	5.109
	H	コイルエンド底FULL クコイル移動	-4.937	-16.278	17.51	7.106	-5.083	-20.059	16.696	5.985

\* 鉄心側より 120.3 の所で分れる。コイル長さ 218

△ 鉄心側より 111.1 の所で分れる。コイル長さ 218

項	条 件	Coil No.								
			1	2	3	4	5	6	7	8
垂 直 方 向 電 力  Kg/M	A	コイルエンド上FULL 左 タンク飽和	0.819	1.399	-1.233	-1.687	-2.910	-2.539	2.603	2.270
	B	コイルエンド上FULL 右	1.726	2.040	-1.479	-2.330	-2.109	-2.326	1.895	1.277
	C	鉄 心 内FULL	0.343	*0.539 -0.163	0.012	-0.669	0.143	-0.248	△0.157 -0.151	0.009
	D	コイルエンド底FULL タンク飽和	1.200	1.677	-1.106	-1.985	-2.257	-2.031	1.751	1.391
	E	コイルエンド上MIN 左	1.415	2.204	-2.654	-3.900	-0.684	-4.755	3.633	3.139
	F	鉄 心 内MIN	1.344	1.510	-1.654	-3.107	0.727	-2.643	1.522	1.424
	G	コイルエンド底FULL タンク未飽和	1.529	1.954	-1.379	-2.268	-2.548	-2.390	2.997	1.795
	H	コイルエンド底FULL クコイル移動	1.524	1.942	-1.366	-2.274	-2.558	-2.390	2.085	1.788

17792

17792

において中割れを生じている。

MINTAP では、# 5 の磁気中心が大きく下に移動するので中割れ現象は消滅する。又コイルエンドでは鉄心が片割れにしか無いので発生しない。理由の詳細説明は 3. 6. 2. 項にある。

#### 4. 主方向にコイルが移動したときの影響 (GH)

短絡時コイルはプレスボードの荷重—応み特性に従つてコイル間距離，コイル—鉄心間距離が変化する。このために，瞬間，瞬間コイルに働く電磁力は変化する。コイルの運動を調べるときには 7. 3. 3 項で述べたように，コイルの移動に伴う電磁力の変化の係数を求めて簡略計算を行なっているが，その精度を検証するために計算したものであるが，短絡によるコイルの移動量は 1000KVA モデルトランスの場合 1mm 以下であるので相対変化量として 5% 以下であり

第 7.4-4 表

Coil No	1	2	3	4	5	6	7	8
コイル中心間距離	11.2	18.4	22.2	18.4	13.6	16.0	20.0	11.2
コイル移動 距離	0.34	0.33	0.62	0.13	0.30	0.75	0.64	0.34
主方向電磁力変化 (%)	+18	+23	+26	+11	- 5	-13	-33	-24
垂直方向      %      (kg)	-5	-12	13	-6	-10	0	-12	- 7

電磁力に与える影響もきわめて小さく，最も大きいもので主方向 0.5% 垂直方向で 1% 程度である。

#### 5. 抵抗紙模倣法との比較

最も大きな差異は計算時間である。抵抗紙模倣法では熟練者で 1 ケース 3 日ほど必要であるが，計算機では上記 8 ケースのほかにも他の大形変圧器の計算 7 ケース計 15 ケースを同時に計算して，計算時間は 4/100Hr であつた。電磁力の比較を行なうと次表のようになる。模倣／計算機 (%) で示す。

第 7.4-5 表 抵抗紙模倣法との比較

		1	2	3	4	5	6	7	8
主方向	エンド，上，左 (飽和)	115.4	103	95.1	97.8	101.8	106.8	95.2	87.5
	“ “ “ “ 右 ( “ )	119.3	109.5	96.3	103	100.3	107	97	94
	鉄 心 内	110.5	104.8	97.8	82.7	127	103	95.6	92.6
	エンド，底， (飽和)	96.6	101.4	91.4	33.4	111.9	103	99.5	107
	“ “ “ “ (未飽和)	91	100	90.5	80.9	116.3	109.5	100.5	111
垂直方向	“ “ “ “ 上，左 (飽和)	197	167	126	145	125	131	130	144
	“ “ “ “ 右 ( “ )	165	131	127	136	145	138	156	178
	鉄 心 内	125	115	-	-	-	-	57	-
	エンド，底， (飽和)	136	100	119	96.5	107	119	120	128
	“ “ “ “ (未飽和)	107	86	96	84	95	100	101	100

計算機と模擬とはかならずしも同一条件ではない。計算機では#4コイルは傾斜しておらず他のコイル同様垂直であり、又タンクは飽和するとしてIMAGEを取っていない。比較のためにコイルエンド、底のみはタンクの影響を含んだ場合も計算し比較した。鉄心内垂直方向で記入の無いのは殆んど電磁力が働かないので略した。

この表を検討して見ると、主方向電磁力では最大15~20%の差があるように見えるが、(2)のところで述べたタンクの飽和の影響を考えに入れて再検討すると大体10%程度の差に入るものと推定され、この値は抵抗紙模擬法の最終精度とも一致する値である。ただし#4、#5コイルの値の差が大きいのは、計算機では#4を傾斜しないものとして計算しているためと考えて除く。

垂直方向電磁力は、タンクの飽和の影響を考慮に入れて修正しても最大50%程度の誤差を生じているものがあるが、垂直方向電磁力は主方向に比して約一桁値の小さいものであるから、模擬法の精度は一桁下ると考えられる。

今回の計算では、傾斜コイルは平均的位置に置かれた平行板として計算したが、傾斜コイルを他のコイルに平行な小片に細分して表現すれば、等価計算が可能である。又現用プログラムは1枚のコイルに働く電磁力の総和が求まるようになっているので、1枚のコイル内の分布を知ることができないが、分布を求めたいときは、1枚コイルを細分して多数枚のコイルとして計算すれば計算できる。第3章模擬法のところで掲げた第3.3-6図、2枚の板電流に働く電磁力の分布はこのように求めたものである。したがって、いつたんプログラムが完成してしまうと、変圧器のように境界が矩形である物の磁界は、計算機の方が抵抗紙模擬法よりもすぐれた方法であると結論できる。

#### 7.4.2. コイルの運動解析

1000KVAモデル変圧器のコイルエンド、底辺の運動解析を、次の5ケースについて計算させた。計算条件として、

##### 5 ケース共に共通な条件

1. 観察点はコイルエンド底部である。
2. 電磁力の計算を行なう場合タンクは未飽和とした。
3. 短絡開始の位相は $20^\circ$ とした。これは実測と合せるためである。
4. 変圧器タップは最高タップで、短絡電流は100%
5. 変圧器イムピーダンスは4.1%
6. 直流分減衰時定数は2.0サイクル

7. 短絡時間 5 ～ 6 サイクル

8. 変圧器の機械的振動減衰常数  $P = 400$

各ケースごとに異なる条件

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5
1. コイル重量	正 規	正規 × 6.25	正規 × 6.25	正 規	正 規
2. 締付圧力	7.56TON	7.56TON	75.6TON	7.56TON	7.56TON
3. 絶縁物特性	STIF2	STIF2	STIF2	傾斜 2 倍	直 線

以上のごとくである。説明を加えると

ケース1

短絡試験を実施した条件に似せて計算したものであつて、コイル重量は設計重量を使用し、締付圧力は試験開始当初の値近くを選んだ。この表現法を用いれば  $0.8\text{kg/cm}^2$  であつて、規格最低値である。

絶縁物特性はコイル群の静的特性試験の結果より推定した STIF2 であつて、

処女曲線

$$0.2 \sim 30\text{kg/cm}^2 \quad D \times I = D \times 0 + \frac{1}{71.5} \ln F_1/F_0$$

$$30\text{kg/cm}^2 \sim \quad D \times I = D \times 0 + (F_1 - F_0)/2060$$

繰り返し曲線

$$0.2 \sim 10\text{kg/cm}^2 \quad D \times I = D \times 0 + \frac{1}{128} \ln F_1/F_0$$

$$10\text{kg/cm}^2 \sim \quad D \times I = D \times 0 + (F_1 - F_0)/2120$$

ケース2

動的に変圧器の機械強度を検討するときに、一番注意を要する点は共振の問題である。ケース1で、短絡終了後の自由振動が約 200 であつたので、共振点近くに持つて行くためにコイル重量を 6.25 倍し振動数を  $1/2.5$  にした。

ケース3

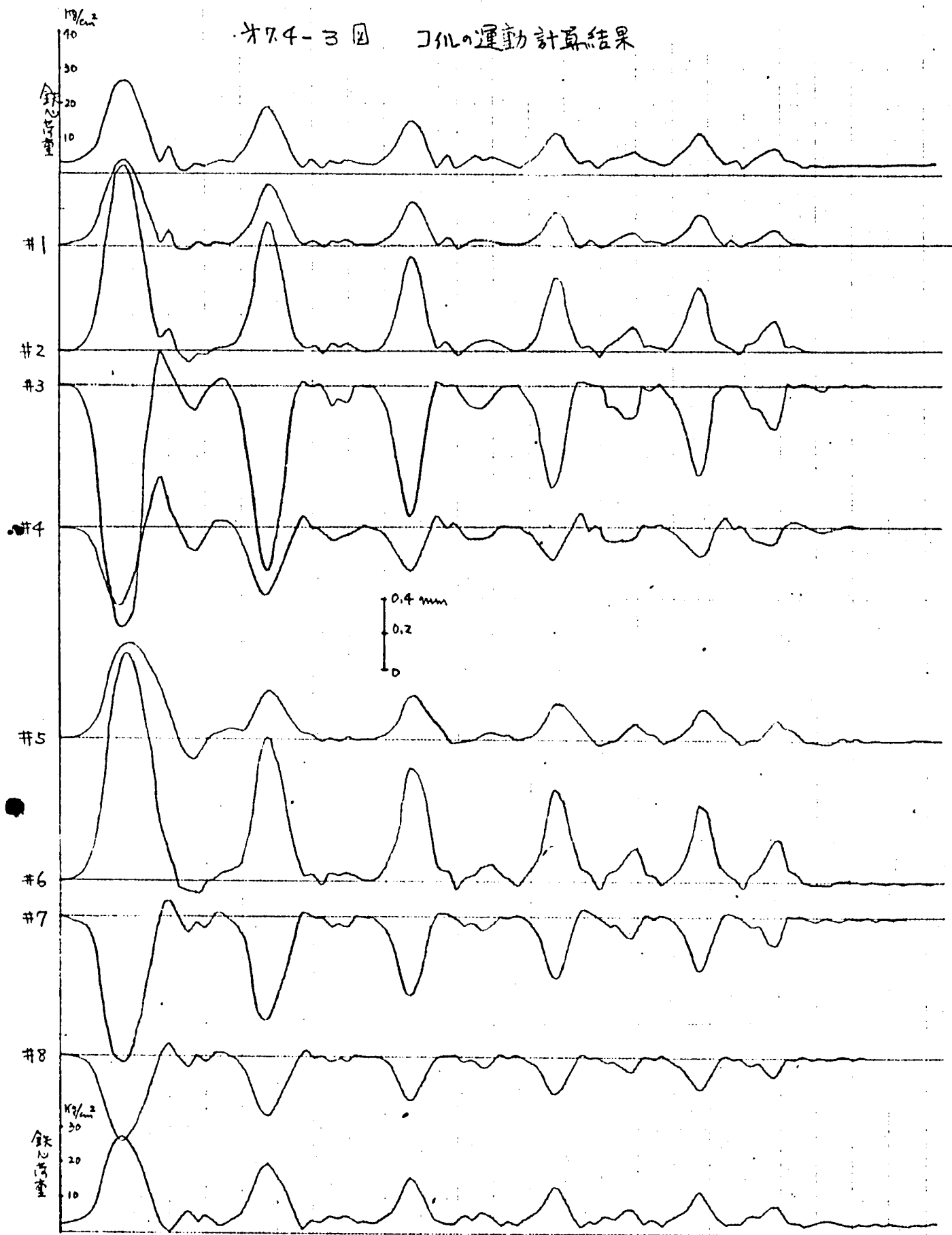
共振点近くにある変圧器の締付圧力を高くしたときにどうなるかを調べる目的で締付圧力を 10 倍した。この値は最大短絡電流時の電磁力にほぼ等しい。

ケース4

プレスボードの性質を予備加圧など適当な手段で固くしたときの性質に似せるために STIF2 の傾斜を 2 倍した。



オ74-3 図 コイルの運動計算結果

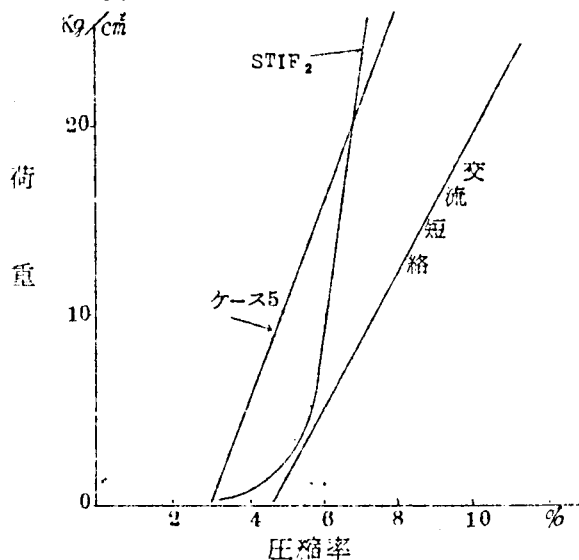


## ケース 5

以上の計算を終つて結果を検討したところ、STIF 2 の特性がコイル群の動的な性質を表していないように見受けられた。

交流短絡試験結果より逆算すると右図のごとく、傾斜一定の直線とした方が適当と思われるので、荷コイル間絶縁材料の特性を

3%  $0\text{kg}/\text{cm}^2$  を通る傾斜 550 の直線として計算した。これは第 8 章で実施した交流短絡試験の実験結果と一致させたものであるが、この試験では、プレスボードを予備加熱圧縮して、特性を少し固くしてある。計算結果をグラフに書き換



討して見る。グラフの 1 例としてケース 5 を第 7.4-3 図に示す。第 7.4-2 図 コイル群の特性

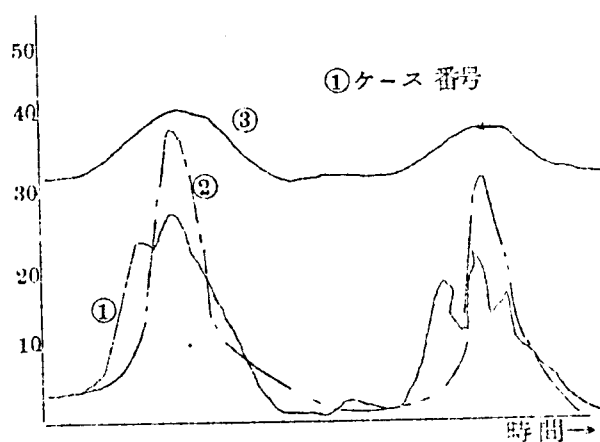
交流短絡試験のオシロと比較して見ると、プレスボードの性質を直線と置いた方が、# 7 コイルの運動、鉄心に働く荷重で比較した時、一致性は良い。比較したオシロは第 8 章の改造後の変圧器で実施した短絡試験の物である。第 4 章で実施した交流短絡試験では、コイルエンド押えの楔の強度が弱く、プレスボードの荷みのほかに楔の撓みが含まれたために、計算結果よりもコイルの運動量は大きい。又 50% 短絡まではコイルの巻き方向の運動を起していないので、波形としてはよく似た形を示しているが、70% 以上の短絡ではコイルの運動は三次元となり、この章で仮定した一次元運動とは異なるので、# 7 コイルの動きも電流零点近傍で高压側に大きく入り込み、計算機の結果とは非常に異つた波形を示している。

改造後の変圧器は楔を鉄板に替え、プレスボードを予備圧縮して少し固くした物である。ケース 1 ~ ケース 4 までの計算では、コイル群の圧縮特性として静的圧縮試験を数式化した物を使用したのであるが、この特性を用いて計算すると、コイルの運動は電流の大きいところではプレスボードの弾性率が急激に高くなるので頭打ちとなり、直流分の含まれる第一波と、直流分の減衰後の振巾にほとんど差が認められず、オシロの波形とは異つてくる。

プレスボード単独の動的性質は、第 6.4.2 項で述べたように、静的特性に比して弾性率が高く静的特性の直線領域 ( $30\text{kg}/\text{cm}^2$  以上) に近い傾斜をもつ直線的性質を示すが、コイル群として組上げたときは、チャンネルの Build up があるので、特性は緩かになり、ケース 5 の計算ではコイル群の特性として、プレスボード単独のほぼ  $1/4$  の傾斜で計算した。

共振の問題はケース 1 とケース 2 を比較すれば検討できる。ケース 1 は自由振動数がほぼ 200 近辺であつたが、ケース 2 はコイル重量を 6.25 倍にした為に自由振動数が約 80 程度に

なり、直流分が含まれている投入直後の60%の電磁力と共振しやすくなった。その影響はコイルの運動に明瞭に現われ、鉄心荷重が40%程増加している。コイルの偏位は、コイル群の圧縮特性として荷重の大きい領域で固い性質を示すような物を使つたので、軽減されているが、やはり#3コイルでは30%程振幅が大きくなっている。ケース5に用いたような特性を使用すれば、もつと顕著に共振現象が現われたであろう。



第7.4-4図 鉄心荷重比較

ケース2のように共振点近くにある変圧器の締付圧力

を一桁大きくし、電磁力の最大値程度にまで締付けると、プレスボードの剛性が上がるために自由振動数は大きくなり、も早共振はしなくなり、コイルの偏位もきわめて小さくほぼ一桁小さくなる。又高圧低圧間も締付力が0になつて口を開けることは無くなるので、鉄心に働く動的荷重は低圧コイル2枚に働く電磁力のほぼ1/2に等しい。たゞ初期締付力が大きいので、総合荷重は高い。これらの関係は第7.4-4図に示される。

プレスボードの弾性率を大きくするためにSTIF2の傾斜を2倍にした場合には、当然のこととして偏位は小さくなっている。又鉄心荷重もケース1に比しわずかに小さい。

コイルの運動に伴う偏位によつてコイル間に働く電磁力は変化するわけであるが、ケース1について計算された結果は下記のとおりである。(電流最大値近傍における値であるが)

コイル番号	1	2	3	4	5	6	7	8
電磁力変化分	15.5	19.2	21.9	10.9	-4.5	-13.0	-33.1	-23.3
同上精密計算	18	23	26	11	-5	-13	-33	-24

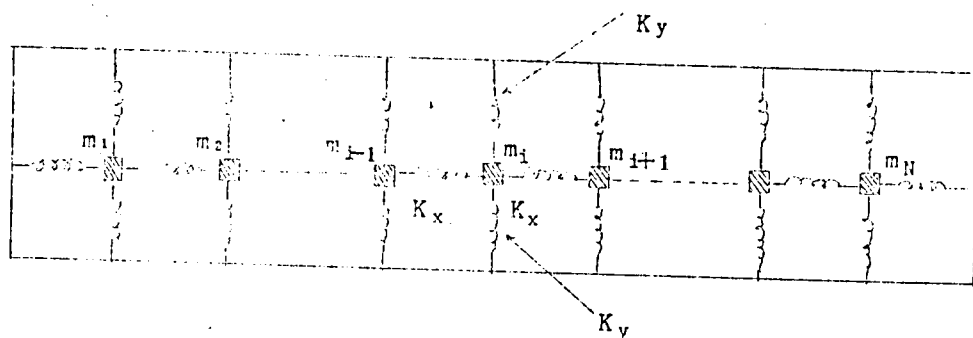
先に電磁力計算のところで求めた結果を最下段に記入したが、簡略計算の結果とほぼ一致している。

### 7.4.3. 二次元運動解析

交流短絡試験の短絡電流70%以上では、コイルの運動は主方向の一次元的運動ではなく、コイルエンド底で観察した場合に、コイル巻き方向の運動、飛び出し方向すなわち垂直運動を含む三次元的運動であつた。しかし、コイルエンドの飛び出し方向の運動量は実測の結果によれ

ばきわめてわずかであつた。これは変圧器の構造によるもので現在の組立法によれば、コイルエンド両端は楔によつて十分上下に突張られているが、鉄心内では垂直方向には特別に支えられていないために、磁気中心がずれた場合には移動可能であつて、これをコイルエンド底より見ると巻き方向の運動となつて観察されるわけであり、交流短絡試験結果では非常に大きな量であつた。そこで主

方向と巻き方向の二次元運動をする場合の微分方程式を立ててみる。矩形コイルの剛性は無限に大き



いとしコイル

第 7.4 - 5 図 二次元運動等価回路

1 枚を 1 質点と考え、主方向を  $x$ ，巻き方向を  $y$  とすると、 $i$  番目のコイルに関し次式を得る。

$$\begin{aligned} m_i \ddot{x}_i + m_i p \dot{x}_i + K_x \partial x_{i+1} - K_x \partial x_i &= F_{x_i} f(t) \\ m_i \ddot{y}_i + \mu (\dot{y}_i) (K_x \partial x_i + K_x \partial x_{i+1}) + K_y \partial y_i &= F_{y_i} f(t) \end{aligned} \quad (7.4-1)$$

ここに

- $m_i$  ;  $i$  番目のコイルの質量
- $x_i$  ;  $i$  番目のコイルの  $x$  方向位置
- $\dot{x}_i$  ; " 速度
- $\ddot{x}_i$  ; " 加速度
- $y_i$  ; "  $y$  方向 位置
- $\dot{y}_i$  ; " 速度
- $\ddot{y}_i$  ; " 加速度
- $\partial x_i$  ;  $i$  番目の絶縁物の荷重 0 の時からの圧縮量 ( $x$  方向)
- $\partial y_i$  ; " ( $y$  方向)
- $P$  ; 粘性摩擦係数で一樣とする
- $K_x$  ; 主方向絶縁物のバネ定数、 $i$  番目に動くプレスボードからの反力は  $K_x \partial x_{i+1} - K_x \partial x_i$  であるが実際は STIF 2 を呼ぶ。
- $F_{x_i}$  ; 主方向電磁力であるが、一次元解析のときに求めた奥行き無限の式では不十分で、有限長板電流間に働く電磁力の式を開発する必要がある。これはコイルエンド底部に相当する長さだけに電流が流れるとするもので

あつて、 $y$  方向の運動量が大きくなると主方向成分もそれにつれて変化するを意味する。理論は第 3.4.2 章に述べた物を使用すればよい。

$\mu(\dot{y}_i)$  ; 動摩擦係数であつて  $i$  番目のコイルの左(右)の絶縁物との相対速度の函数であると考える。更に摩擦力は左(右)側プレスボードの圧縮力に比例するとした。ただしコイルに働く  $y$  方向電磁力がある値以上にならなければコイルは動かないものとする。(静摩擦係数 > 動摩擦係数)

$\mu(\dot{y}_i) K x \delta x_i$  ; 左側プレスボードからの摩擦力

$\mu(\dot{y}_i) K x \delta x_i + 1$  ; 右

$K_y$  ; コイル、コーナーチャンネルのバネ定数, Build up の具合が主方向とは異なるであろうから STIF3 を開発する。

$F_{yi}$  ; 鉄心内コイルに働く垂直方向電磁力の左右脚の不均衡分であつて、一次元解析のときのプログラムを使用可能である。

$f(t)$  ; 電流の二乗の函数

未だ計算機で計算出来る段階にまで至っていないが定性的に考えて見ると、

$x$  方向の運動は摩擦力の形で  $y$  方向に入り

$y$  方向の運動は主方向電磁力の形で  $x$  方向に影響を与えている。

ので、一次元解析の場合とは異なつた挙動が生じ、入り込みの現象が再現できると推定される。

## 7.5. 結 言

1. 変圧器の組立てを計算機の中で模擬することができるようになつた。プレスボードの特性、コーナーチャンネルのビルトアップ、真空浸漬による収縮、組立中の吸湿による膨張などの諸因子を生産技術的に検討し、諸量を果敢して STIF1 を改良すれば、鉄心窓寸法の合理的設計が可能となる。
2. 2 枚の板電流間に働く電磁力の理論式をもとにして、変圧器各コイルに働く垂直方向、主方向の電磁力計算が可能となつた。計算時間は大型変圧器でも 1/100Hr 程度で精度、速さ、労力の点で抵抗紙模倣法に優る。
3. 鉄心の影響は IMAGE 法によつて解くが、IMAGE は一次迄取れば 97% 程度の精度を持つであろうと推定される。
4. 垂直方向電磁力は鉄心内では中割れする場合があるが、その可能性を INPUT で教え込めば、検定して中割れするコイルは分離点を境にして上下 2 枚のコイルとして計算するプログ

ラムを組んだ。

5. 1000 KVA モデルトランスについて抵抗紙模擬の結果と比較すると、主方向は10%以内で一致しているが、垂直方向はもう少し悪い。抵抗紙模擬法の精度が悪いとみるのが妥当である。
6. 変圧器を多次元振動系と考えて微分方程式を立て、機械系の諸常数を仮定して計算したところ、系の固有振動数を電源周波数に近づけると共振現象が起り、コイルの偏位、鉄心に作用する荷重共々増大した。縮付荷重を大きくして電磁力よりも大きくすると高低圧間の縮付力は0になることが無いために、動的荷重は電磁力のほぼ1/2となるが、静的初期縮付力と合計するとプレスボードに作用する荷重は大きい。
7. 短絡オシロと良い一致を示したのは、コイル群の圧縮特性を直線とみなした場合である。この時の弾性率はプレスボード単独の時の弾性率の1/4程度であるが、これはコイル群に組上げたときにはコーナーチャンネルのビルトアップの非常に弱い弾性加算されるためである。
8. 交流短絡試験で電流が70%以上の場合のコイルの運動と、計算機の結果には差異があった。すなわち、低圧7番コイルがオシロでは高圧側に大きく入り込むのに、計算機ではそのような現象は発生しなかった。これは計算機は一次元運動で解いたのであるが、交流短絡試験の大電流短絡では三次元運動をしているためである。更に良いシミュレーションを行なうために二次元運動の理論式を立てた。

## 文 献

- 1) J.Kulda,  
Problems of large transformer.  
ii Short-Circuit Forces in Large Transformers  
CIGRE No.136 1958
- 2) A.Richon, B.Hochart, F.Salgues, Problems Concerning the Behaviour of Transformers on Short-Circuit  
CIGRE No.142 1958
- 3) C.de Kuijper Th.Schenk  
The Calculation of the Radial Magnetic Field Component in Windings of Core Type Transformers  
CIGRE No.141 1962
- 4) L.Torseke,  
Short-Circuit Problems in Large Transformers.  
CIGRE No.142 1962
- 5) Y.Tournier, G.Ebersole,  
A Study of the Dynamic Behaviour of Transformer Windings under Short-Circuit Conditions.  
CIGRE No.143 1962
- 6) G.B. Watts, B.Sc.,  
A Mathematical Treatment of the Dynamic Behaviour of a Power Transformer Winding under Axial Short-Circuit Forces.  
P.I.E.E Vol.110 No.3 MARCH. 1963
- 7) A.B Madin, B.Eng., J.D. Whitaker, B.Eng.,  
The Dynamic Behaviour of a Transformer Winding under Axial Short-Circuit forces  
P.I E.E. Vol.110 No.3 MARCH 1963
- 8) M.F. Beavers, C.M. Adams,  
The Calculation and Measurement of Axial Electromagnetic Forces on Concentric Coils in Transformers.  
Transaction Paper 59-56

## 第8章 短絡強度を増強する方策

第7章までの検討によつて、変圧器の短絡強度を決定する要因、変圧器の短絡電磁力に対する性質、コイル構成材料の機械的性質などが明らかとなつたので、短絡強度を増す対策のうち、簡単に実施できるものは対策を施した変圧器を組立て、再度交流短絡試験を実施し確認した。またこの試験の間に合わなかった事項に対しては別の試験もしくは理論的推定を行なった。

### 8.1. 確認のための交流短絡試験

先の交流短絡試験後の解体点検で利用したことは

1. カルタピッチにおいて、接合部線が湾曲していた。
2. 接着紙の破れた個所が電磁力の大きいところに多い。
3. カルタの鋭角部が、接合部紙に嵌込み、破れている。またカルタの陵で、コイル表面に強い跡が残っている。
4. 木製楔が破損したために、コイルエンドが湾曲し、コイルの運動が大きかつた。
5. 短絡中、コイルの運動が激しく、又短絡による緩みも大きい。

などである。これらのうち(3)、(4)、(5)の対策として下記のような手取を講じた。

#### 8.1.1. 対 策

1. 接着紙の破れを防ぐ目的で、カルタの下にテトロン紙、処理紙を敷き効果を調べることにした。
2. 接着紙の破れを防ぎ、かつコイルの平面度をよくすることによつて耐付力のゆるみを防止する目的で、コイルに接着剤を塗付、ヒートプレスで圧着、平面度をよくしたコイルを試作適用した。

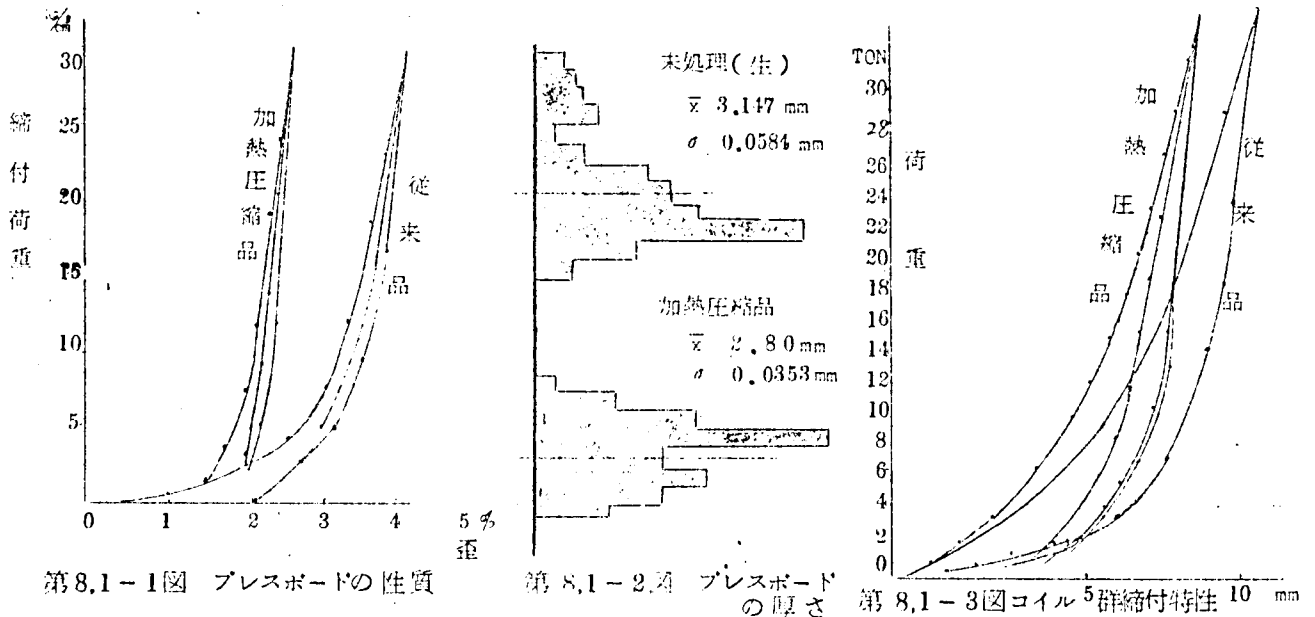
またカルタのあたる部分のみヒートプレスし、その上にテトロン紙と処理紙を貼り相乗効果の有無を検討することとした。

3. コイルエンド補付け用の木製楔を、決裂に変更。
4. 短絡時のコイルの運動を決定し、かつ短絡によるゆるみのもととなるのはカルタおよびワッシャの機械的性質である。理想的な処理としては、短絡時に遭遇する最大荷重まで繰返し荷重をかけて完全に締め直す方法であるが、変圧器の工法上から考えると、コイル群組立後の補付けで短絡電磁力に相当するところまで繰返し締めることは不可能であるので、プレ



スボード素材のときに加熱圧縮したものを使用する。この試験では油浸は行なわなかつた。

加熱圧縮したものと、第1回の交流短絡試験に使用した従来の標準工作法による油浸品との特



性比較は、第8.1-1図のとおりである。従来の品は荷重の始点を  $0.2 \text{ Kg/cm}^2$  としたものに比し、今回は  $1 \text{ Kg/cm}^2$  としているので始点に多少の食い違いがあるが、今回のものは非常に固くなつて特性が立っていることがわかる。圧縮による厚みの減少は11%程度であり分布の形も変わる。コイル群に組立てた場合の特性は第8.1-3図に示すとおりで、先回のものよりはだいぶ固くなっているが、残留歪（ループ）は大きい。これは、チャンネルの Buildup によるものである。したがって、プレスボードの弾性率向上による機械系の振動数の向上は期待できるが、ループに帰因するゆりみに対しては効果があるかどうか疑われるが、結果は短絡試験に待つこととする。

### 8.1.2. 交流短絡試験

今回の試験目的には、電磁力の推定精度の件は除外し、コイル絶縁紙の損傷と、プレスボードの性質を固くし、楔を丈夫にした影響を研究するのが主目的であつたので、測定項目も少くした。

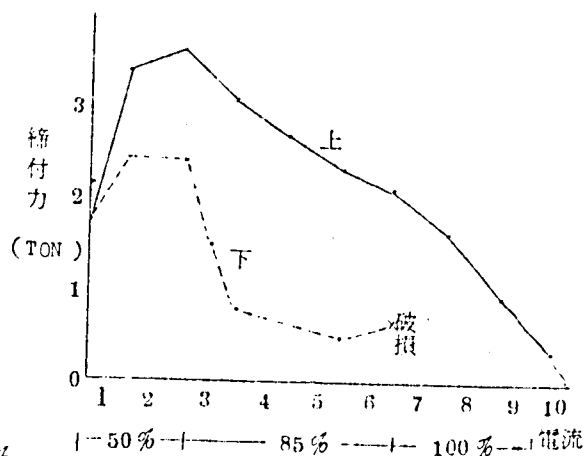
- |                |                 |
|----------------|-----------------|
| 1. 一次電流        | 2. 二次電流         |
| 3. #7コイル主方向偏位  | 4. #7コイル垂直方向偏位  |
| 5. 主方向電磁力（上、下） | 6. 一次電圧および発電機電圧 |

測定結果の一覧表を第8.1-1表に、又代表的オシロを第8.1-4図に示す。

これらを検討した結果、次のことがわかつた。

### 締付荷重

右図は試験の進行にしたがつて締付荷重がどのように変つて行つたかを示すものである。第4章の交流短絡試験のときは50TON荷重計2個のうち、1個は締付荷重、他の1個は主方向電磁力の測定に使用したが、今回は2個とも、締付荷重と主方向電磁力の測定に使用した。その結果、荷重計は必ずしも同じ値を示すものでないことがわかった。最初の50%



第 8.1.-5 図

締付力の変化

組立時、ほうほうの摩擦で締付荷重が荷重計に全部かゝらず、どこかで食われていたのが、短絡によるコイルの運動、振動によってなじみが良くなったために、荷重計に締付荷重が良く伝わるようになったためと考える。短絡電流による締付荷重のゆるみぐあいは今回の方がはるかに小さく、電流を増加した初回の短絡によるゆるみは

電 流	第 1 回試験のゆるみ	今回試験のゆるみ
85%	40%	15%
100%	70%	25%

と非常に改善されている。この理由はプレスボードを予備圧縮して荷重一撓み特性を改善したためである。(楔の改善は鉄心内の締付荷重には影響無い)しかし短絡を重ねるにしたがつて締付荷重は低下し、10回の試験の後には締付力は0になつた。したがつて、プレスボードの予備圧縮による特性改善は、締付荷重のゆるみに対しては抜本的改善とはならず、ゆるみの速度を落す効果を持つのみである。

### 主方向電磁力

全体の形としては電流の2乗に似た形であるが、上下2個の50TONロードセルの波形も完全に同じでは無い。第一波の最大或高値も両者の間に差があり、とくに電磁力の小さい間がはなはだしいのは、締付力のときとどうよう、なじみの問題と思われる。電磁力推定値との比較では今回の方が低目に出ているが、プレスボードの性質改善によるものか、それとも先回は1個の荷重計のデーターを4倍し、今回は2個のデーターを2倍したためによるものであるか判別できない。計算機の結果ではプレスボードの特性を固くすると鉄心荷重は多少減少することになつている。

### コイルの運動

主方向の運動はプレスボードの特性を固くしたことで、楔を強くして剛性を増したために

第8.1-1表 改造後の交流短絡試験結果

番号	一次端子 電圧 KV	一次電流 KA (P-0)	二次電流 KA (P-0)	タップ	締付力 TON	主方向 上	主方向 下	#7 偏位 垂直方向	#7 偏位 主方向	備考 (カメラ)
21-1	3010	4470	15000	大	6.82	2.8	1.37	0.05	0.14	
2	3025		14720	大	9.90	1.72	1.23	0.05	0.13	
3	5190	7390	23800	大	10.22	10.58	7.11	0.19	0.56	○
4	5310	7160	23400	大	6.56	11.22	11.24	0.19	0.53	○
5	5310	7050	23200	大	5.70	11.39	12.08	0.18	0.50	
6	5310	7190	23200	大	4.92	12.8	12.0	0.18	0.50	
7	6250	8050	26000	大	4.92	12.51	14.02	0.19	0.69	○
8	6400	8360	26600	大	5.72	14.85		0.19	0.89	○
9	6350	8320	26800	大	3.08	14.32		0.12	0.89	
10	6310	8400	26800	大	1.12	15.52		0.10	0.91	

注) 21-8以後はLoad Cell破壊のため、締付力TONは測定できず、

ゆえに50TON Load Cellの(上)の値を、4倍して求めた。

(6/19)

F21-4

17793

为8.1-4 图 改密TR. 85% 短结

空载残压

一次电压

50T 荷重

50T 荷重

偏位 (垂直方向)

偏位 (主方向)

一次电流

二次电流

303.5

V/mm

294.5

V/mm

0.74

TON/mm

0.648

TON/mm

0.123

mm/mm

0.038

mm/mm

416

A/mm

2380

A/mm

振巾は小さくなり、100% 短絡において 0.9mm で、先回の 1/3 である。又コイルの振動固有周波数は非常に高くなり、電磁力との間に位相差も無くなり、静止位置よりもはいる現象もなく、電流遮断後の自由振動も消えている。この傾向は短絡強度にとつては好ましい現象と考えられる。高速カメラによる観測結果でも、コイルの運動はきわめて小さかつた。又コイルの巻き方向の運動は認められなかつた。これは鉄心内垂直方向 AT のズレが無いように組立てられていたためか、それともコイルの運動が小さいような構造に改良された効果によるものか、判別しがたいが、さきの交流、直流短絡の場合は 75% 以上の電流が流れ始めると移動を生じたにもかかわらず、今回は 85% 以上の電流を 8 回流してもまったくずれなかつたこと、およびコイル組立時によく導体中心を合せることと留意せず標準の組立を行なつたことより考えて、プレスボードを固くし、楔を鉄に変えたことはコイルのズレに対して有効であつたと推定できる。

#### 8.1.3 解体の実際結果

カルタピッチは改善していないので、高低圧群の向き合う #2, #3, #6, #7 コイルに波打ちが生じ、コイル素線が彎曲し、接着紙が破れたのは第一回目の交流短絡試験のときとどうようである。

接着紙の裂れを防ぐ意味で貼りつけた紙のうち、テترون紙は非常に優秀な成績で、カルタの陵の部分においてもぜんぜん破れることは無かつたが、処理紙はもろくて導体素線に沿つてほうほうで破れた。

接着剤をプレスで圧着したコイルは #4 であるために、電磁力が割合小さく波打ちの生じないものであつたが、コイル導体素線に沿つてヒビがはいり、あまり有効な手段とは判断できなかつた。

第 8.1-6 図はテترون紙と処理紙の効果比較写真である。

#### 8.2. その他の方策

交流短絡試験を実施して確認した対策のほか、短絡強度を増す方法として次のような事項が考えられる。

##### 8.2.1. カルタスパンを狭くする

1000 KVA モデル変圧器ではカルタスパンが広すぎたためにコイル素線に永久歪が発生し、またそれが原因で接着紙が破れた。しからばカルタスパンはいかほどか最適設計かを考えるに、

1. 銅線に許容される動的応力は, 1000 回の同一荷重の繰返しに対して 0.2% の永久伸びを許すならば  $8.2\text{Kg/mm}^2$  である。ただし銅線は紙巻きに  $5\text{Kg/mm}^2$  程度の初期荷重を受けているものとする。(6.1.3.銅線の動的な性質)
2. カルタスパン間の多層導体は, もしも変圧器の締付が適当に行なわれている場合には, カルタ部分で固定されている梁を考え, 梁の断面係数として多層導体が並列に並べられたときの値を用いれば, スパン中央における応力は理論式とよく一致する。又実験結果による端部における応力は理論値よりは小さく, 中央における値の 1.3 倍程度である。(6.2.3.分布荷重に対する性質) の結論が得られているのでモデルトランスの #5 コイルについて試算すると

$$\text{鉄心内電磁力} = 0.10\text{Kg/M} \quad 100\text{Aにて}$$

$$\text{短絡電流最大値} \quad 7.5\text{KA}$$

$$\text{ゆえに短絡時最大電磁力} \quad 560\text{Kg/M}$$

導体寸法

$$3(5 \times 3.5) \text{EW}$$

導体断面二次モーメント

$$\frac{1}{6}bh^2 * 3 = 0.0306 \text{cm}^3$$

固定端における応力は

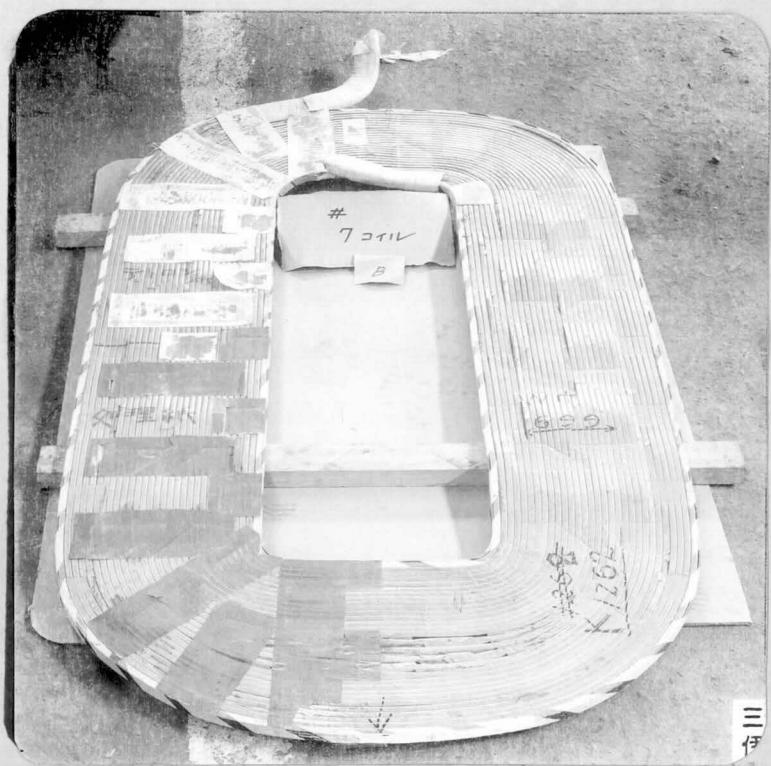
$$\sigma = 1.3 * \frac{\omega \ell^2}{24} / Z_{eq}$$

$$\dots\dots\dots (8.2-1)$$

この式より, 許容最大応力値が与えられたときのカルタスパンを計算すると

$$\ell = \sqrt{\frac{24 \sigma Z_{eq}}{1.3 \times \omega}}$$

$$\approx 90 \text{mm}$$



第 8.1.一 6 図 テترون紙と処理紙の比較

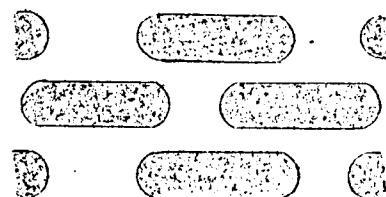
となる。短絡試験結果を再検討して見るに, #5 のコイルはぜんぜんスパン間で永久歪を発生しておらず, #4 で僅かに生じていたことより, この辺が限界と考えられる。

ところが #5 のコイルのカルタスパンはカルタ平行部で 100, 傾斜のところでは 130, で

あつたにもかかわらず，目に見えるような彎曲は発生しなかつたことより判断して，材料の強度の検討結果を基にして設計すると安全側にあるようである。しかし，モデル変圧器の短絡回数は100%は僅か5回にすぎず， $8.2\text{kg}/\text{cm}^2$ の動荷重を受ける銅線の動的性質から判断すると，残留歪の量は1000回短絡のときの $1/4$ で0.05%と，きわめて微量であるために，解体点検のときにぜんぜん永久歪を発生しないと判断したが，厳密にはすでに曲つていたかも知れない。また上記設計法では，多層巻の等価係数を求めるときの安全率を閑却して計算しているが，実験データによつても1.14程度はあるので，これらを総括して考えると，大体現在までに得られた計算式を用いて計算すれば実情に合致するものと考えられる。

カルタピッチを狭くするということを実施する場合に問題点

となるのは，冷却とのかね合ひである。ピッチを小さくすれば当然冷却が悪くなる。右図は狭くしたものの一例で，カルタ角が絶縁紙を傷つけないように小判形にしてある。



変圧器の内部冷却の問題はいまだ未解決の点がたくさんあり

理論的に決定できず，過去の経験を基にして設計する場合が

第 8.2-1 図

カルタ貼りの一例

非常に多い。流速に関しては，ある仮定のもとでは模擬できるので，複雑なカルタ配置であつても流体抵抗，すなわちタンク内におけるヘッドロスを推定することができる。

ある点における流速を $V$ ，流体の密度を $\rho$ ，その点に湧き出る流体体積を $q$ とすると，連続の理論より

$$\text{div}(\rho V) = \rho q - \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (8.2-3)$$

流体を非圧縮性流体とし，かつ湧出が無いところにおいては，

$$\text{div}(V) = 0 \quad \dots\dots\dots (8.2-4)$$

渦が無い場を考えると

$$\text{rot } V = 0$$

なる関係が成立し，速度ベクトル $V$ は1つのスカラー量，速度ポテンシャル $V$ との間に

$$V = -\text{grad } V \quad \dots\dots\dots (8.2-5)$$

なる関係があるので，(8.2-4)，(8.2-5)を組合せ

$$\left. \begin{aligned} \text{div grad } V &= 0 \\ \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (8.2-6)$$

なる Laplace の式が成立し、抵抗流で模擬することができる。しかしこの考えは Fully developed flow, すなわち境界に接するところに粘性による速度損失は無いという仮定のもとに立てた式であるから、この式を利用することはできない。

実験結果と模擬による圧力損失を比較検討して、実験式的に修正係数を見出すべきであろう。

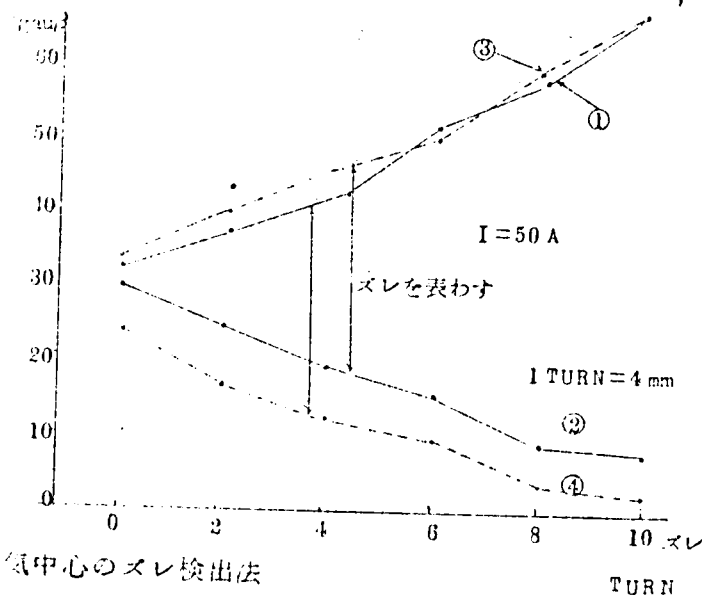
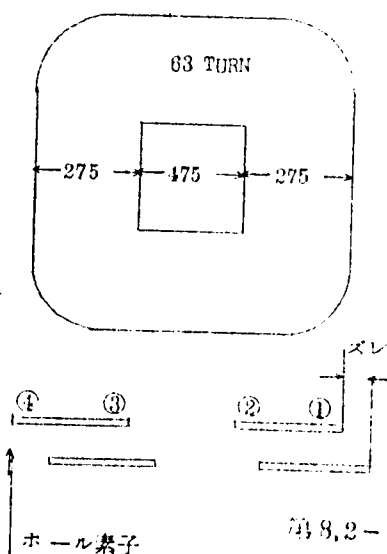
ダルシー、ワイスバッハの与える管断面 ( $2a \times 2b$ ) の摩擦係数は

$$\lambda = \frac{64}{Re} \cdot \frac{8a^2}{(a+b)^2 X} \quad \left. \begin{aligned} X &= \frac{16}{3} - \frac{1024}{\pi^5} \frac{b}{a} \left[ \tanh \frac{\pi a}{2b} + \frac{1}{3^3} \tanh \frac{3\pi a}{2} + \dots \right] \right\} \dots (8.2-7)$$

で与えられ、 $X$  は  $a/b$  が 1.0 程度で飽和する函数であるので、普通の油道の設計であれば (8.2-6) 式はよい推定値を与えると考えられるが、この問題はもつか研究中である。

### 8.2.2 磁気中心を合せること

短絡中のコイルの運動を観察した結果によると、コイルは主方向、垂直方向、巻き方向、の三次元的な動きをする。コイルエンドで観測したときに、巻き方向の動きは、鉄心内における垂直方向の移動であつて、原因は鉄心内磁気中心のズレに基づくものである。普通鉄心内においては、設計上、磁気中心は一致しているものであり、かりに多少の差があつたとしてもコイルが左右対称であれば、左右両脚で打ち合つていつほりにずれると云う現象は発生しないはずである。ところが実際にはコイル組立時に磁気中心がどちらかにズレることが起り得る。コイルは積み重ねられ、さらにワッシャー、チャンネル、で蔽れているので、寸法検査によつて合せることは困難である。これを解決する方法として、中身組立時に一次二次に適當な直流電流を流し、磁氣的に組立時のズレを計測する方法を立案し、模擬試験を実施した。2枚の同じコイルを逆直列に接続して直流を流し、4連磁束（主方向電磁力相当）を測定したところ、



第8.2-214 磁気中心のズレ検出法

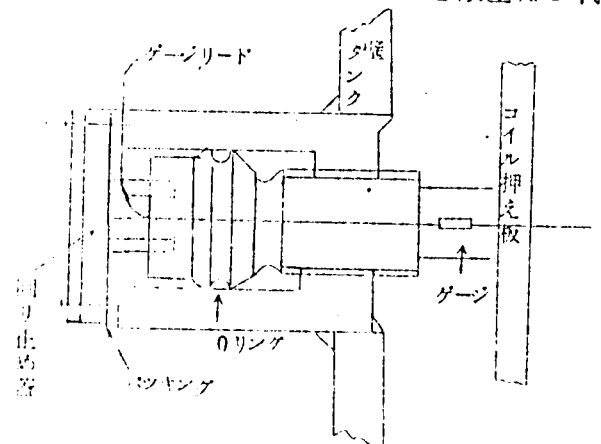


コイルの左右のズレに対してきわめて精度良く検出可能なことがわかった。下図は実験結果であるが、2枚のコイルの磁気中心が合っているのは、①=④、②=③のときであつて、グラフの0はいまだ一致したところで無いと判断される。目で判断したところよりも0.5TURN=2mmほど左によせたところに磁気中心の一致点があるらしい。

### 8.2.3. コイルエンドを締付ける

変圧器コイルが短絡時に受ける電磁力は、主方向と垂直方向の2つの成分であるが、主方向電磁力は、IHLのコイル構成について考えて見ると、低圧コイルを鉄心に押付け、高圧コイルを中央に集める方向に働く。そのために高圧、低圧間にはギャップができ、高圧は宙に浮くことになる。したがって高圧巻線の垂直方向電磁力が左右鉄心内、もしくは上下コイルエンド内で打消し合わずに残る分があると、高圧コイルを鉄心内でいづばうに押し付けたり、コイルエンド部で飛出し、引込みの現象を生じ、これらがさらに磁気中心のズレを助長させて垂直方向電磁力が増大し、コイル内周が鉄心に強くあたり、機械力に耐えられなくなつたコイル素線がいわゆる脱線を起し、コイル絶縁紙に傷がついてターン間短絡を引き起すという経過が短絡機械力による事故発生の端りと推定される。(これらのほか、前述の主方向電磁力によるもの、コイル全体の変形によるものもあり。)

この現象を防ぐには電磁力が働いているときでもコイル群が宙に浮かないようにする必要がある。そのためには短絡中でも主方向締付力が残つておつて摩擦力が働き、垂直方向の動きを止めることが必要であるが、普通の工作法では短絡電磁力以上に締付けられた変圧器を組立てることは困難である。そこで予備圧縮されたプレスボードを使用し、たとえ短絡によつてプレスボードがさらに縮むことがあつてもその量が少いようにし、さらにコイルエンド部に下図に示すような外周より締つけられるボルトを設ければ、短絡によつて緩んだ分を増締めすることができる。またコイル締付け用の水圧器が容量不足であつても、毎回の短絡電磁力を水圧器の代用とすることもできるわけである。ただこのためには第一回の短絡でズレが生じないように磁気中心を合せておくこと、予備加熱、圧縮をしたプレスボードを使用し、収縮率の小さいものを使用する必要がある。さもないと増締めをしていつたときに、鉄心の内と外と



第8.2-3図 締付ボルト構造

の境にクビレを生ずることになる。縮付刀はボルトに貼ったゲージで測定する。

#### 8.2.4. そ の 他

垂直方向電磁力に対するコイルの強度を増強するために、導体サイズを大きくするのが安直な方法であるが、漏洩磁束による浮遊損失が増加するので大きくできない場合がある。第 6.3.5 項で述べたように、コイルエンドの形状を円弧とすれば垂直方向のズレ量が等しいと仮定すると現用のものよりは垂直方向電磁力が減少し、また梁としての強度も僅に増加し両方の効果で約 1.8 倍強くなるので一策である。ただこのようなコイル構造にすると通常の鉄心構造ではイムピーダンスが増加するので、コイルエンド円弧部にも鉄心を積む工夫をする必要がある。

短絡試験の結果によると鉄心内コイル部は垂直方向電磁力に対して割合弱く、プレスボード楔に細工をしなかつたときには、70% 電流で動き始めた。この方向の動きは最後には主絶縁の破壊を招く恐れがあり好しくない。

現用のコイル群縮付は主方向だけに実施しているが、垂直方向にも成形して、余分な空間をコイル群組立時に殺してしまふ必要があると思う。また鉄芯積の最終段階で、たとえば鉄心とコイル群との間に楔を打込むというような方式で、主方向、垂直方向ともに縮付圧力を確立する方式をくふうすべきである。

コイルエンド部の垂直方向電磁力に対する強度を増す方法として、コイル素線を何本かごと強くしぱり、層の間でスリップしないようにすれば断面二次モーメントが大きくなつて強くなるのではないかと考えられるが、いまだアイデアの段階であり、またコイル巻き法にくふうが入要と思う。

#### 8.3. 結 言

1. プレスボードは予備加圧して弾性率を高くしたものを使用し、コイルエンドの楔を鉄製品に変えて短絡試験を実施したところ、コイルの座動も小さく、鉄心内における垂直方向のズレも発生しなかつた。又テトロン紙を接着紙に上貼りしたものは、カルタによる傷もつかず絶縁上有効であつた。
2. 変圧器の縮付力はプレスボードの性質を変えても最終的にはゆるむものである。ただ速度を減少させることができるだけである。
3. 交流短絡試験で実証できたことのほか短絡強度を増す方策として

- (1) カルタスパンの合理的な決定算式
- (2) 磁気中心の合せ方
- (3) コイルエンドを焼付けろ方
- (4) コイルエンドを円頭にする方
- (5) 垂直方向の余分な距離を減らしてコイル群を組立てる

などが立案された。

## 第9章 結 論

外鉄形変圧器の短絡強度に関し一連の研究を行なった結果を簡単にまとめるとつぎのようになる。

- 1) 研究をおこなうにあたり、実物の変圧器について短絡試験を実施することは、費用の点からみても、また短絡試験設備の点からいつでも不可能であるので、モデル変圧器を作成して研究したが、モデル変圧器にある特定対象の縮尺モデルにするか、一般標準設計の小形を作るかについて検討したところ縮尺モデルは電氣的、機械的相似性を同時に満足することは不可能で、とくに動的な強度特性を検討するときには矛盾が多いことがわかったので小形標準設計の変圧器を作った。
- 2) 短絡強度を決定する要因は、大別して、誘起電磁力の大きさと、コイル群の機械的強度の2つであると考えられる。電磁力の大きさを推定する方法として、抵抗紙模擬法を利用したが、この方法の精度について徹底的に検討し、模擬技術を確立した。また模擬結果と実測結果を比較検討し、三次元を二次元で模擬するときの誤差について検討し、二次元の模擬によって三次元の場を模擬することが可能であることを、理論と実測の両方から検証した。
- 3) モデル変圧器の構造を、短絡試験時にいろいろの測定が可能であるように作つてあつたので、短絡時に働く電磁力、コイルの運動に関する情報を大量に蒐集することができた。このデーターを解析したところ、抵抗紙模擬法が有効な推定手段であることが実証された。また変圧器の故障検出法として、インピーダンス、静電容量の測定は有効な方法であって、変圧器の設計裕度を参考にしてこれらの変化量を検討すれば、大略のコイルの変位、移動が推定可能である。また高次までの共振周波数、衝撃電圧試験の波形の測定によって、さらに詳細な内部故障の検出が可能であることを提案した。
- 4) 整流器の逆弧による短絡現象を、モデル変圧器3台と整流器を組合せて試験し、短絡時の現象は交流短絡試験の直流分をふくむケースと等価であることが判明した。
- 5) 短絡電磁力を受けるコイル構成材の機械的性質については、国の内外を問わずあまり研究が進んでいない。とくに周波数の高い領域における発表はきわめて少ない。特別に動的試験装置を作成し、銅線、銅線束、矩形コイル、プレスボードについて研究し、これらコイル構成材の機械的性質をほとんど明らかにすることができた。またこれらの結果と、電磁力の推定結果をもとにして合理的な設計が可能となった。
- 6) 抵抗紙模擬法そのものは、原理的には非常にすぐれた手法であるが、労力の点で難点があ

る。そこで電子計算機を利用して電磁力の推定をおこたう方法を確立し利用したところ、速度、精度の点できわめて優秀な結果をえた。鉄心の影射は IMAGE をとって等価にしているが、次数1までとれば実用上差支えない計算をえることができる。抵抗紙模倣法との優劣比較では、境界条件が変圧器のように直線、矩形であるものは計算機のほうがあらゆる点でまざっている。

変圧器の構成材料の性質を変え、組立条件を変えて実際に短絡試験を実施することは費用、労力の点から不可能であるので、変圧器を多次元の振動系で現わし、電子計算機の中でいろいろの条件をシミュレートして短絡時にあらわれる現象を再現さし検討したところ、変圧器は、設計、組立いかんでは機械的共振の可能性が十分あり、共振点においてはコイルの運動、プレスボードに働く力は電磁力よりも大きくなり、危険なことがわかった。またコイル群の機械的性質は、プレスボード単独の特性とは、またことなつた性質を示すこともあきらかとなつた。

- 7) プレスボードの性質を固くし、木製楔を鉄製に変えるなどの対策をたてた変圧器を組立て再度試験を実施し、これらの方策が有効であることを確認するとともに、第2章～第7章までにえられた情報をもとにして変圧器の短絡強度を増強する方策について立案した。
- 8) 以上一連の研究を終了し検討不十分の点、こんど研究すべき点を列記すると
  - (1) カルタスパンを決定するところで述べた、多層梁の理論式の数値解法を行ない、絶縁紙の圧縮特性、電磁力、所致の間の定量的関係式を見いだす。第6章でえた等価断面係数の概念はまだ少し甘すぎるように思える。
  - (2) 矩形コイルの機械的性質を、多層リングの理論式の数値解を求めて検討する必要がある。この検討が進めば、短絡試験のとき、低圧巻線の垂直方向電磁力の推定と、実測の一致があまりよくなかつた理由も判明するであろう。
  - (3) 故障検出法として、高次の共振周波数まで測定し、その変化のぐあいと、別途電子計算機で求めた計算結果とを比較検討して、コイル群内の故障まで検出する方法の確立すること。(計算機のプログラムは完成している)
  - (4) コイルの運動を二次元的に解析することによって、短絡のシミュレーションをよくし、垂直方向の強度も同時に検討すべきである。

## 謝 辞

本論文の作成過程において、いろいろご指導を賜った、京都大学 林重憲教授に深甚なる謝意を表すとともに、執筆にさいしご助言をいたゞいた、京都大学 卯本助教授に感謝の意を表する。

また本研究を開始する直接の要求元であった、広尾変圧器製造部長、村上次長、田村変圧器開発課長からは、専門家としての立場から貴重なご意見をいただき、坂田開発係長には現用の設計法、工作法からモデル変圧器の設計、工程にいたるまで、なみなみならぬ協力とご指導を辱のうした。ここに深く感謝の意を表する。

白井製造管理部次長には直接の上司として、研究活動にいろいろ便誼をはかっていただき、また研究方法、執筆についてもご指導を賜った。また下記のかたがたには研究を推進するにあたって、直接作業を分担し、それぞれの分野で多大の援助を賜った。深く感謝申し上げる。

変圧器製造部	西 山 氏	モデル変圧器の設計
	織田・竹田 氏	モデル変圧器の組立、解体
試作研究課	高 橋 技 師	機械量の検討
	山・村 技 師	短絡試験の測定
	渡 辺 技 師	電子計算機による解析
	篠 原 技 師	矩形コイルの機械的性質
	山 本 技 師	銅線の動的特性
	長 江 技 手	プレスボードの機械的性質
	太 田 技 手	コイルの短絡試験
	定 行 技 手	引張り、圧縮試験
	平 山 技 手	短絡試験の測定
	安 田 技 手	抵抗紙模擬、故障検出法
	熊 谷 書 記	資料整理、校正
	荒 畑技師見習	計算機プログラミング
	居 蔵技師見習	計算機プログラミング